

Kapitel 3

Grundlagen der Zerspanung

Unter Zerspanung werden nach DIN 8580 alle Verfahrensvarianten der 3. Hauptgruppe – Trennen – zusammengefasst, bei denen die Formänderung durch Verminderung des Materialzusammenhalts erfolgt. Die Formänderung wird erreicht, indem eine Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück realisiert wird, bei der eine Energieübertragung stattfindet [DIN8580].

Diese Grobeinteilung wird in der Norm zur Einteilung der Fertigungsverfahren Spanen, der DIN 8589, verfeinert. Spanen ist wie folgt definiert: Trennen, bei dem durch die Schneiden eines Werkzeuges von einem Werkstück Werkstoffschichten in Form von Spänen auf mechanischem Wege abgetrennt werden. Spanen umfasst nach DIN 8580 im Ordnungssystem der Fertigungsverfahren die Gruppen 3.2 – Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden und 3.3 – Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden.

Der erste Teil des Kompendiums der Fertigungsverfahren beschäftigt sich ausschließlich mit Verfahrensvarianten der Gruppe 3.2, und deshalb wird im Folgenden nur noch von Zerspanung im Sinne von Zerspanung mit geometrisch bestimmten Schneiden gesprochen. Allen Verfahren der Gruppe mit geometrisch bestimmten Schneiden ist gemein, dass sie ein Werkzeug verwenden, dessen Schneidenanzahl, Geometrie der Schneidkeile und Lage der Schneiden zum Werkstück bestimmt sind.

Zur Beschreibung der Schneidteile sind einige Begriffe und Bezeichnungen notwendig, die im Folgenden erklärt werden.

3.1 Der Schneidteil – Begriffe und Bezeichnungen

Die Begriffe, Benennungen und Bezeichnungen zur Beschreibung der Geometrie am Schneidteil sind in der DIN 6581 festgelegt. Der Schneidteil ist der wirksame Teil des Werkzeugs, an dem sich die Schneidkeile mit den Schneiden befinden. Der idealisierte Schneidkeil wird durch zwei Flächen gebildet: Der Span- und Freifläche, die sich in einer Strecke schneiden, der Schneide S. Der Winkel

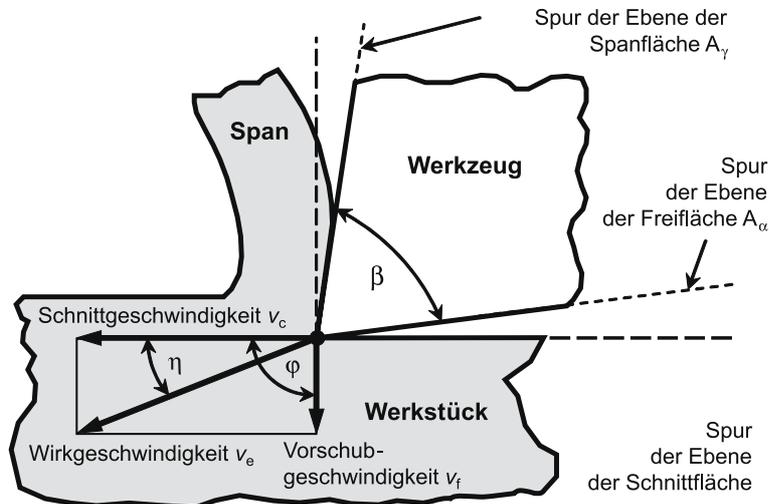


Abb. 3.1 Beschreibung des idealisierten Schneidkeils

zwischen diesen beiden Flächen wird als Keilwinkel β bezeichnet. In Abb. 3.1 ist ein idealisierter Schneidkeil dargestellt [DIN6581].

Die Spanfläche A_γ ist die Fläche der Schneide, auf der der Span abläuft. Die Freifläche A_α ist die Fläche am Schneidkeil, die der neu entstehenden Werkstückoberfläche, der Schnittfläche, zugekehrt ist. Diese Bezeichnungen verdeutlichen, dass der Schneidkeil (Werkzeug) immer in Beziehung zum Werkstück zu betrachten ist, was bedeutet, dass der Verfahrenskinetik eine erhebliche Bedeutung zukommt.

Um eine vereinfachte Beschreibung der Verfahrenskinetik zu ermöglichen, wird häufig eine Modellvorstellung benutzt, das Modell des ausgewählten Schneidpunkts. Das Modell vereinfacht die wirkliche Kinetik, indem die räumlichen Geschwindigkeitsfelder in einem Punkt, dem ausgewählten Schneidpunkt, zusammengefasst werden. An dem ausgewählten Schneidpunkt können die Geschwindigkeitsfelder durch Vektoren zusammenfassend dargestellt werden. Die so entstehenden Vektoren können durch Vektoraddition zu einem Gesamtvektor zusammengefasst werden. Meistens wird das Werkstück als ortsfest angenommen; alle Bewegungen werden vom Werkzeug ausgeführt. Der resultierende Geschwindigkeitsvektor wird als Wirkgeschwindigkeit v_e bezeichnet. Er kann in zwei Komponenten zerlegt werden; die Schnittgeschwindigkeit v_c in Schnittrichtung und die Vorschubgeschwindigkeit v_f in Vorschubrichtung. Zur eindeutigen Lage der Komponenten der Wirkgeschwindigkeit sind zwei Winkel definiert:

- Der Wirkrichtungswinkel η als Winkel zwischen Wirkrichtung und Schnittrichtung, vgl. Abb. 3.1
- Der Vorschubrichtungswinkel φ als der Winkel zwischen Vorschubrichtung und Schnittrichtung, vgl. Abb. 3.1

Da in der Praxis keine idealscharfen Werkzeuge vorliegen, wird eine Schneidkantenverrundung berücksichtigt, Abb. 3.2.

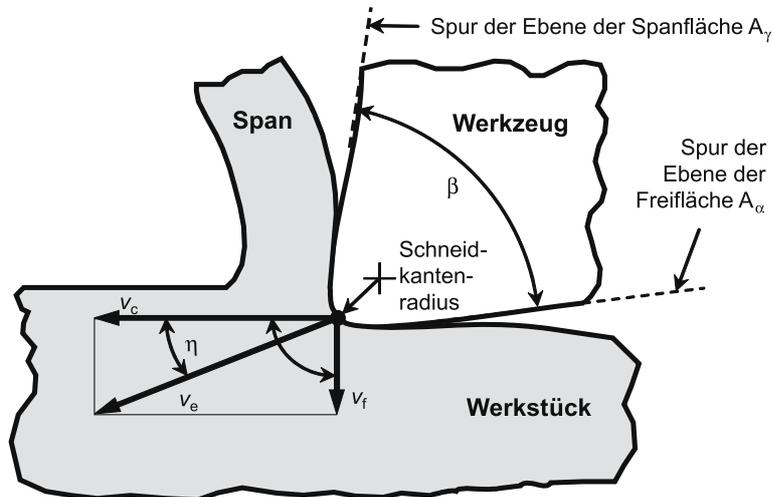


Abb. 3.2 Schneide mit Schneidkantenradius

Frei- und Spanfläche sind fast immer im Übergang gekrümmt. Diese Krümmung wird durch den Schneidkantenradius r_β beschrieben.

Bislang wurden die Begriffe an einem einfachen Schneidkeil erläutert, der durch zwei Flächen gebildet wurde. Im Allgemeinen wird mit komplexeren Werkzeugen gearbeitet, die sich aus mehreren Schneidkeilen zusammensetzen. Im einfachsten Fall aus einem Hauptschneidkeil und einem Nebenschneidkeil, Abb. 3.3.

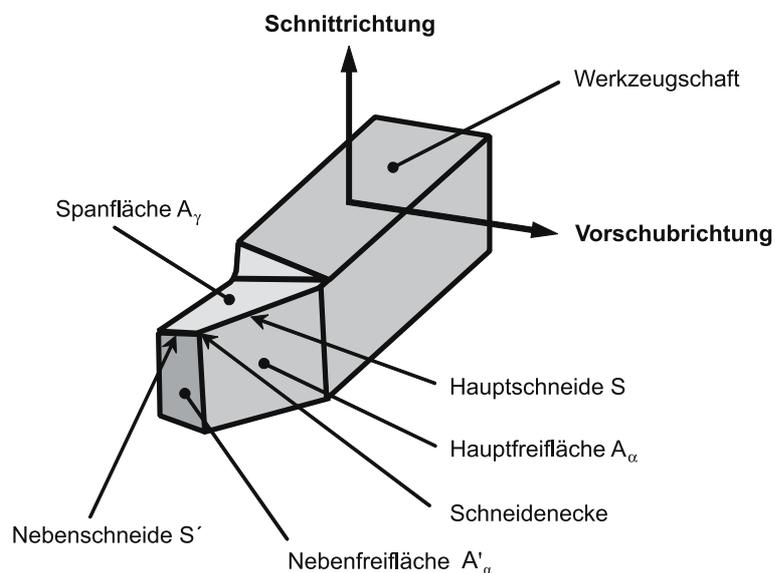


Abb. 3.3 Schneiden und Flächen am Schneidkeil, nach: DIN 6581

Dementsprechend spricht man von der Haupt- und von der Nebenschneide. Die Hauptschneide S ist immer der Schnittfläche zugewandt, die Nebenschneide S' immer der gefertigten Fläche [DIN6580]. Liegt der ausgewählte Schneidenpunkt auf der Nebenschneide, werden die in ihm definierten Begriffe entsprechend benannt und mit einem Apostroph (') versehen. Die geraden Bereiche von Haupt- und Nebenschneide werden durch den Eckenradius r_e miteinander verbunden, Abb. 3.6.

3.2 Bezugssysteme

Zur eindeutigen Beschreibung von Ort, Lage und Bewegungsrichtung eines Schneidkeils werden Bezugssysteme verwendet, in denen charakteristische Ebenen definiert sind, die für alle Verfahrensvarianten gelten.

Die beiden genormten Bezugssysteme sind das Werkzeug- und das Wirk-Bezugssystem, Abb. 3.4. Das Werkzeug-Bezugssystem wurde für die Werkzeugkonstruktion, sowie für die Herstellung und Prüfung von Zerspanwerkzeugen entwickelt. Im Werkzeug-Bezugssystem werden die Werkzeugwinkel ohne Berücksichtigung der Verfahrenskinetik gemessen. In realen Zerspanprozessen weichen die wirksamen Winkel aufgrund der Verfahrenskinetik aber unter Umständen von den nominellen Werkzeugwinkeln ab (Ausnahme Keilwinkel). Aus diesem Grund wurde auch ein Wirk-Bezugssystem definiert, Abb. 3.4 rechts.

Das Werkzeug-Bezugssystem ist ein System, dessen Bezugsebene orthogonal zur angenommenen Schnitttrichtung ausgerichtet ist. Im Unterschied dazu ist die

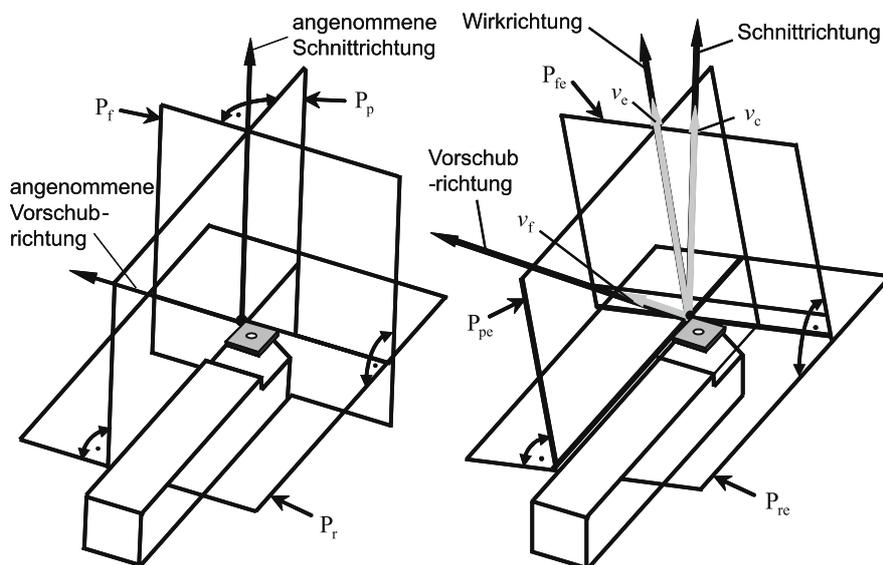


Abb. 3.4 Werkzeug-Bezugssystem (links) und Wirk-Bezugssystem (rechts), nach DIN 6581

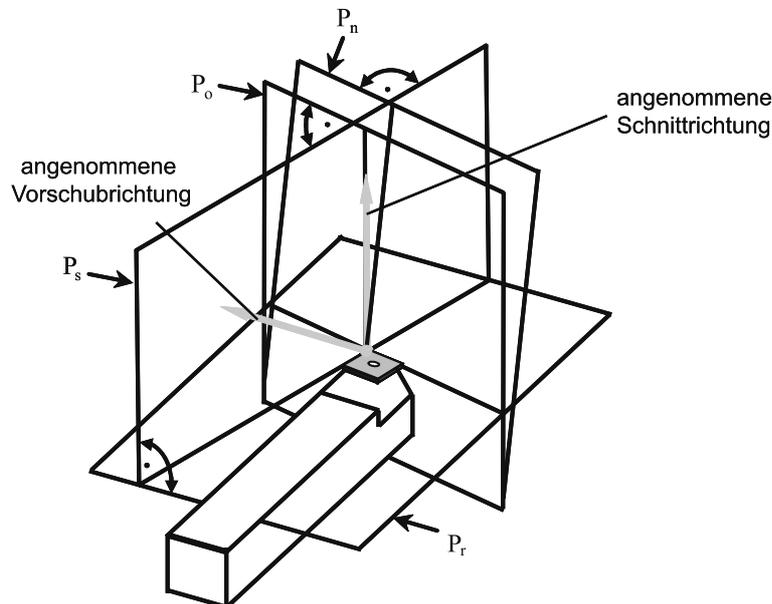


Abb. 3.5 Orientierung im Werkzeug-Bezugssystem

Bezugsebene des Wirk-Bezugssystems orthogonal zur Wirkrichtung ausgerichtet. In beiden Systemen enthalten sämtliche Ebenen den ausgewählten Schneideneckpunkt. Die Bezugssysteme stimmen dann überein, wenn die Schnitttrichtung der Wirkrichtung entspricht.

Zunächst wird das Werkzeug-Bezugssystem betrachtet, Abb. 3.4 links und Abb. 3.5:

- Die Grundebene, auf der alle anderen Ebenen aufbauen, ist die Werkzeug-Bezugsebene P_r . Sie enthält die eventuell vorhandene Drehachse und liegt senkrecht zur angenommenen Schnitttrichtung.
- Die Werkzeug-Schneidenebene P_s verläuft tangential zur Schneide S und senkrecht zur Werkzeug-Bezugsebene P_r .
- Die Werkzeug-Orthogonalebene P_o liegt senkrecht zur Werkzeug-Bezugsebene P_r und senkrecht zur Werkzeug-Schneidenebene P_s .
- Die angenommene Arbeitsebene P_f liegt senkrecht zur Werkzeug-Bezugsebene P_r und parallel zur angenommenen Vorschubrichtung.
- Die Werkzeug-Rückebene P_p steht senkrecht auf der Werkzeug-Bezugsebene P_r und senkrecht auf der angenommenen Arbeitsebene P_f .
- Die Werkzeug-Schneidennormalebene P_n liegt senkrecht zur Schneide S . Die Werkzeug-Schneidennormalebene P_n ist identisch mit der Wirk-Schneidennormalebene P_{ne} , da sie nicht an der Werkzeug-Bezugsebene, sondern an der Hauptschneide ausgerichtet ist.

Das Wirk-Bezugssystem ist gegenüber dem Werkzeug-Bezugssystem um den Wirkrichtungswinkel η gedreht. Im Wirk-Bezugssystem werden die gleichen Indizes wie im Werkzeug-Bezugssystem verwendet; ihnen folgt jedoch zusätzlich noch ein e , das für „Wirk“, engl. *effective*, steht.

Zur eindeutigen Kennzeichnung aller Werkzeug- und Wirkwinkel wird ihnen der gleiche Index zugeordnet, der die Ebene bezeichnet, in der diese Winkel gemessen werden. Beispielsweise wird der Werkzeug-Orthogonalkeilwinkel β_o in der Werkzeug-Orthogonalebene P_o oder der Wirk-Seitenspanwinkel γ_{fe} in der Arbeitsebene P_{fe} gemessen.

Damit innerhalb der Bezugssysteme die Orientierung der Schneiden bzw. die Lage von Span- und Freifläche im Raum eindeutig festgelegt werden kann, sind Angaben über drei Winkel um die drei rotatorischen Achsen im Raum erforderlich. Für einen optimalen Zerspanungsvorgang sind für die drei rotatorischen Raumachsen bestimmte Orientierungen verantwortlich. Im Folgenden werden diese Winkel exemplarisch im Werkzeug-Bezugssystem erläutert:

- Lagewinkel um eine Drehachse, die orthogonal auf der Werkzeug-Bezugsebene P_r steht:
Als Winkel, der die Lage der Hauptschneide S in der Werkzeug-Bezugsebene P_r festlegt, wird der Werkzeug-Einstellwinkel κ_r zwischen der Werkzeug-Schneidenebene P_s und der angenommenen Arbeitsebene P_f , gemessen in der Werkzeug-Bezugsebene P_r , definiert. Er wird in mathematisch positivem Sinn von der angenommenen Arbeitsebene P_f aus gemessen, Abb. 3.6.
- Lagewinkel um eine Drehachse, die orthogonal auf der Werkzeug-Schneidenebene P_s steht:
Als Winkel, der die Lage der Hauptschneide S in der Werkzeug-Schneidenebene P_s festlegt, wird der Werkzeug-Neigungswinkel λ_s zwischen der Hauptschneide S und der Werkzeug-Bezugsebene P_r , gemessen in der Werkzeug-Schneidenebene P_s , definiert. Der Werkzeug-Neigungswinkel wird im mathematisch positiven Sinn von der Hauptschneide auf die Werkzeug-Bezugsebene P_r gemessen, Abb. 3.7.

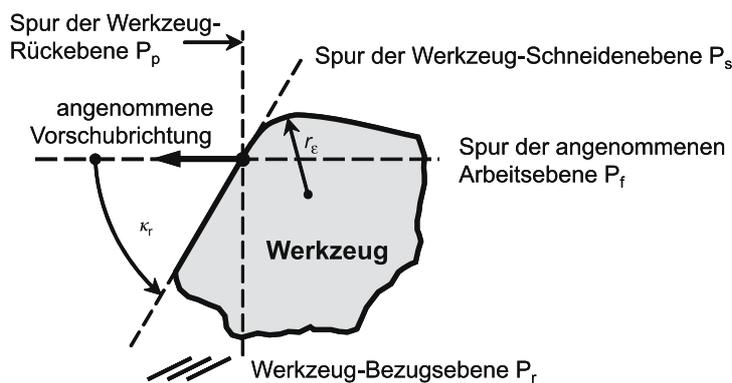


Abb. 3.6 Die Lage des Werkzeug-Einstellwinkels κ_r

- Lagewinkel um eine Drehachse, die orthogonal auf der Werkzeug-Schneidennormalebene P_n steht:
Diese Drehung wird durch einen der Werkzeugwinkel α_n oder γ_n , verwirklicht, die in der Werkzeug-Schneidennormalebene P_n gemessen werden. Als Lagewinkel wird üblicherweise der Werkzeug-Normalspanwinkel γ_n verwendet, da er großen Einfluss auf den Zerspanprozess hat, Abb. 3.8.

Er wird im mathematisch positiven Sinn zwischen der Werkzeug-Spanfläche A_γ und der Werkzeug-Bezugsebene P_r in der Werkzeugschneidennormalebene P_n gemessen. Der Werkzeug-Normalkeilwinkel β_n ist immer fest am Werkzeug und kann durch eine Werkzeugdrehung nicht verändert werden. Der Werkzeug-

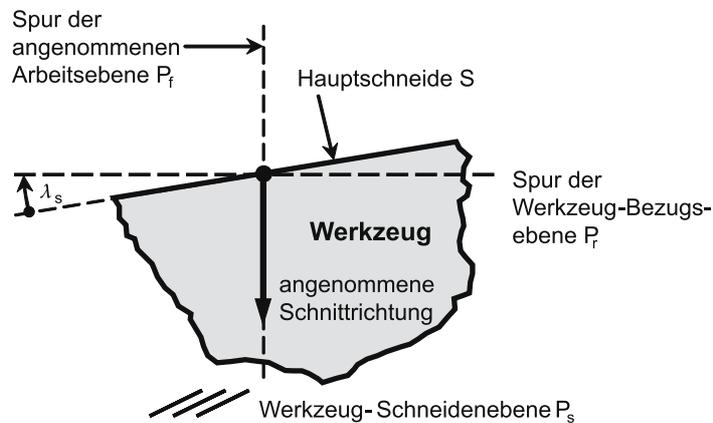


Abb. 3.7 Die Lage des Werkzeug-Neigungswinkels λ_s

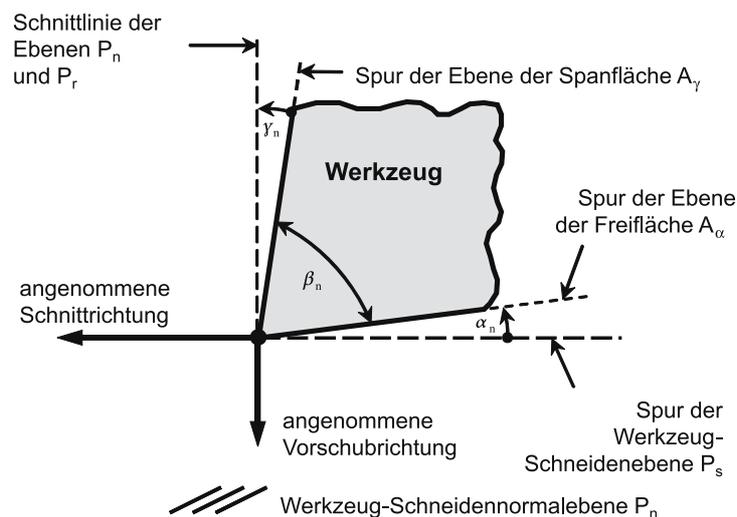


Abb. 3.8 Lage des Schneidkeils im Werkzeug-Bezugssystem

Normalfreiwinkel α_n liegt zwischen der Werkzeug-Freifläche A_α und der Werkzeugschneidenebene P_s , gemessen in der Werkzeugschneiden-normalebene P_n .

Als Werkzeug-Orthogonalfreiwinkel α_o wird der Winkel zwischen Freifläche A_α und der Werkzeug-Schneidenebene P_s , gemessen in der Werkzeug-Orthogonalebene P_o , bezeichnet. Als Werkzeug-Orthogonalspanwinkel γ_o wird der Winkel zwischen Spanfläche A_γ und Werkzeugbezugsebene P_r festgelegt. Als Werkzeug-Orthogonalwinkel β_o wird der Winkel zwischen der Spanfläche A_γ und der Freifläche A_α bezeichnet. Für die in der Werkzeug-Orthogonalebene P_o , der angenommenen Arbeitsebene P_f und der Werkzeugschneidennormalebene P_n definierten Freiwinkel, Keilwinkel und Spanwinkel gilt, dass sie in der Summe jeweils einen 90° Winkel bilden.

Als wesentliche Einflussparameter auf den Zerspanungsprozess gelten die kinematischen Größen Werkzeug-Einstellwinkel κ_r , Werkzeug-Neigungswinkel λ_s und Werkzeug-Normalspanwinkel γ_n . Für weitere Informationen wird ergänzend auf die DIN 6582 verwiesen.

3.3 Grundlegende Verfahrensvarianten

Beim Zerspanen gibt es sehr viele Verfahrensvarianten, diese können jedoch alle in drei Hauptkategorien eingeteilt werden:

- Freier, orthogonaler Schnitt,
- freier, schräger Schnitt und
- gebundener, schräger Schnitt.

Der freie, orthogonale Schnitt ist ein Sonderfall, der durch folgende Randbedingungen herbeigeführt werden kann:

- Es ist nur die Hauptschneide im Eingriff (frei).
- Der Werkzeug-Einstellwinkel κ_r beträgt 90° (orthogonal).
- Der Werkzeug-Neigungswinkel λ_s ist gleich 0° (orthogonal).

Praktisch kann dieser Schnitt z. B. durch Längs-Plandrehen oder Quer-Runddrehen, vgl. Kap. 9.1 – unter Berücksichtigung der genannten Randbedingungen – verwirklicht werden, Abb. 3.9.

Der freie, schräge Schnitt ist allgemeiner und beinhaltet den freien, orthogonalen Schnitt. Die folgenden Randbedingungen sind beim freien, schrägen Schnitt zu verwirklichen:

- Es ist nur die Hauptschneide im Eingriff (frei).
- Der Werkzeug-Einstellwinkel κ_r kann Werte ungleich 90° annehmen (schräg).
- Beliebige Werkzeug-Neigungswinkel λ_s sind zulässig (schräg).

Sobald eine der letzten beiden Randbedingungen erfüllt ist, gilt der freie, schräge Schnitt. Es müssen also nicht gleichzeitig beide Bedingungen erfüllt sein, sie können jedoch gleichzeitig vorliegen.

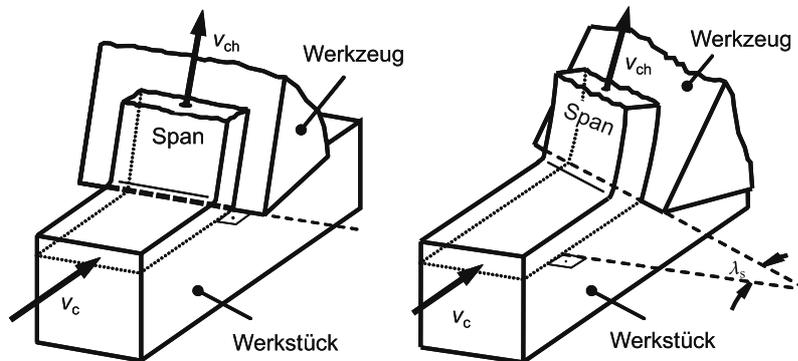


Abb. 3.9 Der freie, orthogonale und der freie, schräge Schnitt

Der allgemeine Fall, der gebundene, schräge Schnitt, vgl. Abb. 3.10, beinhaltet alle vorstehenden Sonderfälle und lässt zusätzlich zu den Randbedingungen des freien, schrägen Schnittes auch noch den Eingriff der Nebenschneide zu (gebunden).

Alle grundlegenden Verfahrensvarianten können noch erweitert werden, indem als weitere Kategorien hinzugefügt werden:

- Der ununterbrochene Schnitt und
- der unterbrochene Schnitt.

Der unterbrochene Schnitt ist dabei die allgemeine Variante, bei der der Schneideneingriff nur zeitweise erfolgt. Beim ununterbrochenen Schnitt ist die zeitliche Unterbrechung unendlich klein bzw. der Schneideneingriff kontinuierlich. Diverse Details beider Verfahrensmöglichkeiten werden in späteren Kapiteln noch ausführlich beschrieben (vgl. Kap. 9 und 10). Es existieren somit sechs grundsätzliche Verfahrensvarianten.

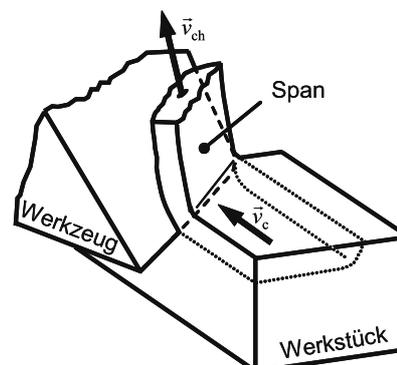


Abb. 3.10 Der gebundene schräge Schnitt

3.4 Spanbildung

Zu Beginn des Spanbildungsvorgangs dringt der Schneidteil in den Werkstoff ein, welcher dadurch elastisch und plastisch verformt wird. Nach Überschreiten der maximal zulässigen werkstoffabhängigen Schubspannung beginnt der Werkstoff zu fließen. Bedingt durch eine vorgegebene Schneidteilgeometrie bildet sich der verformte Werkstoff zu einem Span aus, der über die Spanfläche des Schneidteils abläuft.

Die plastische Verformbarkeit ist keine ausschließlich werkstoffseitige Eigenschaft, sondern sie kann auch durch veränderte Belastung ganz gezielt erreicht werden. Um eine plastische Verformung eines gegebenen Werkstoffs zu erreichen, sind Betrag und Richtung der Belastung von entscheidender Bedeutung. Der Betrag der Spannungen wird durch die Vorschubgeschwindigkeit v_f , die Schnittgeschwindigkeit v_c und die Schnitttiefe a_p beeinflusst. Die Richtung der Schneidkeilbelastung wird auf der Seite der Verfahrenskinetik durch Festlegung des Werkzeug-Normalspanwinkels γ_n , des Werkzeug-Einstellwinkels κ_r und des Werkzeug-Neigungswinkels λ_s bestimmt.

Um eine Spanbildung zu gewährleisten ist eine Mindestspannungsdicke und -schnitttiefe zu überschreiten, vgl. Kap. 7 [Moll39, Djat52, Soko55, Bram61, Bram60].

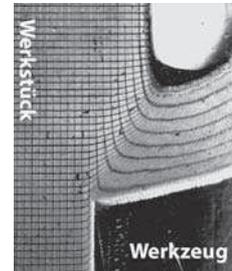
3.4.1 Der Schnittvorgang

Durch Variation der Richtung und des Betrags der Belastung kann zähes oder sprödes Werkstoffverhalten erreicht werden [Karm11, Böke14]. Dieses hat großen Einfluss auf die Spanbildung. Die Richtung eines Belastungsfalls lässt sich bei der Zerspanung durch die Verfahrensparameter Werkzeug-Normalspanwinkel, Werkzeug-Einstellwinkel und Werkzeug-Neigungswinkel einstellen. Der Betrag des Belastungsfalls wird durch die Schnittparameter Schnittgeschwindigkeit, Vorschubgeschwindigkeit und Schnitttiefe beeinflusst. Anders formuliert verhält sich derselbe Werkstoff je nach Richtung und Betrag der Belastung zäh oder spröde, unabhängig davon, wie er sich bei Raumtemperatur und bei einachsiger Zugbeanspruchung verhält (Zugversuch).

Beim Zerspanen von Stahl ist zu berücksichtigen, dass sprödes Verhalten nur bei sehr niedrigen Temperaturen auftritt. Anders ist dies bei der Bearbeitung von Gusseisen, Glas und Keramik. Hier liegt auf Grund des Werkstoffaufbaus auch bei hohen Temperaturen sprödes Bruchverhalten vor. Somit muss der Belastungsfall in Richtung und Betrag durch die Verfahrenskinetik optimal an die gegebenen Werkstoffeigenschaften angepasst werden.

Zur Verdeutlichung der plastomechanischen Vorgänge bei der Spanbildung wird auf das Werkstück ein Raster aufgebracht, Abb. 3.11, so dass die Verformung des Werkstoffs während der Zerspanung beobachtet werden kann (Methode

Abb. 3.11 Modellvorstellung der Formänderung, nach Leopold [Leop00]



der Visioplastizität) [Hast67, Chi171, Leop80, Leop00]. Mit dieser Methode kann der Spanbildungsvorgang sichtbar gemacht werden, und hierauf aufbauend können Spanbildungsmodelle formuliert werden. Eine andere Möglichkeit zum Modellieren der Spanbildung ist die Methode der Finiten Elemente. Die Methode der Visioplastizität kann helfen, FE-Modellierungen zu verifizieren, da sie eine zeitliche und örtliche Auflösung der Spanbildung durch das aufgebrachte Raster ermöglicht [Leop80].

Bei der Spanbildung liegen besondere Randbedingungen vor: Sowohl hohe Spanflächentemperaturen (ca. 770–1700°C) als auch hohe Formänderungsgeschwindigkeiten (Größenordnung: 10^4 1/s)

Abbildung 3.12 zeigt schematisch den Spanbildungsvorgang, wie er anhand einer Spanwurzelaufnahme (rechts im Bild) nachgezeichnet wurde.

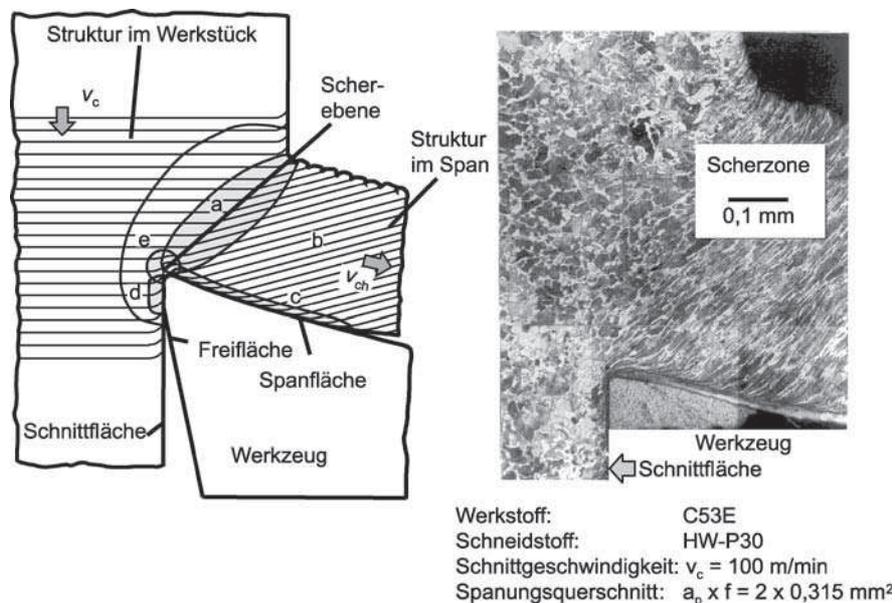


Abb. 3.12 Spanentstehungsstelle

Die Darstellung lässt eine kontinuierliche plastische Verformung erkennen, die sich in vier Bereiche aufteilen lässt. Der Strukturverlauf im Werkstück (a) geht durch einfaches Scheren (Scherbereich) in den Strukturverlauf des Spans (b) über. Bei der Zerspanung spröder Werkstoffe kann bereits eine geringe Verformung in der Scherebene zur Werkstofftrennung führen.

Hat der Werkstoff jedoch eine größere Verformungsfähigkeit, so erfolgt die Trennung erst vor der Schneidkante im Bereich (e). Die Zugbelastung unter gleichzeitig senkrecht wirkendem Druck führt in Verbindung mit der hier herrschenden hohen Temperatur zu starken Verformungen in den Randbereichen der Spanfläche (c) und der Schnittfläche (d). Beim Abgleiten über die Werkzeugflächen entstehen in den Grenzschichten zusätzlich weitere plastische Verformungen. Die so genannte Fließzone (nicht angeätzte weiße Zone an der Unterseite des

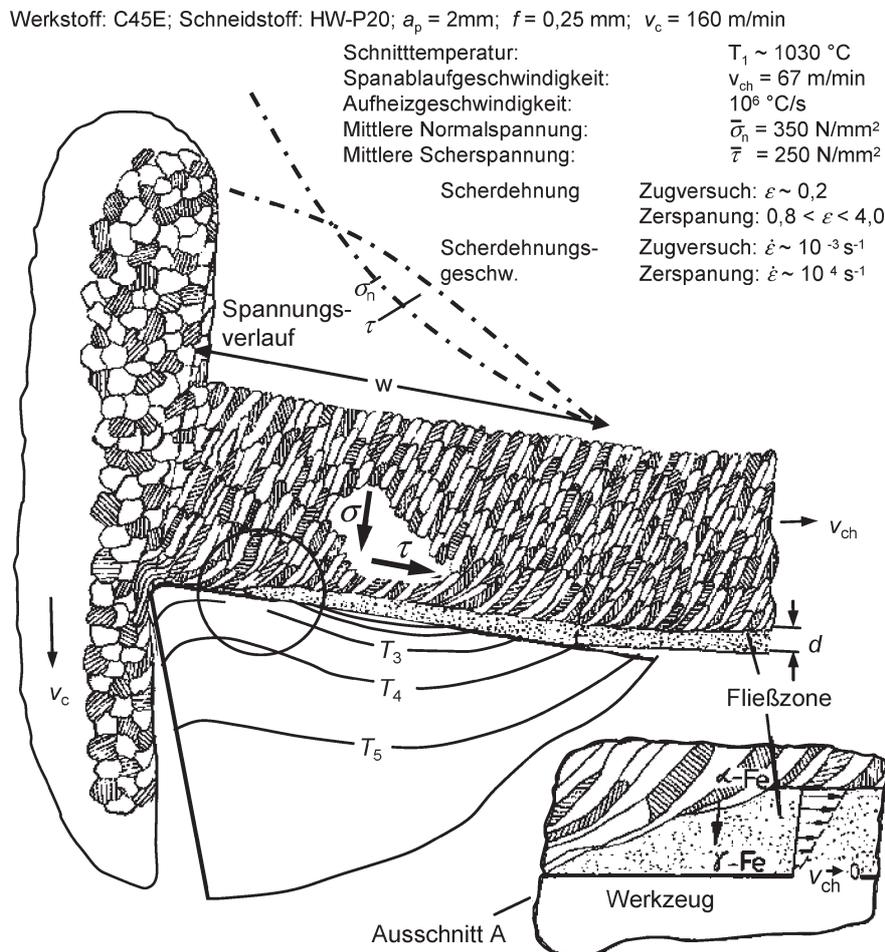


Abb. 3.13 Bedingungen bei der Zerspanung, nach König [Köni67]

Spans), deren Verformungstextur sich parallel zur Spanfläche ausbildet, vermittelt den Eindruck eines viskosen Fließvorgangs mit extrem hohen Verformungsgrad. Der aufgrund des beschriebenen Spanbildungsvorgangs entstandene Span wird als Fließspan bezeichnet. Andere Spanarten sind der Lamellenspan, der Scherspan und der Reißspan.

Der Verlauf der Normal- und Tangentialspannungen, die aus den auf die Spanfläche wirkenden Zerspankraftkomponenten resultieren, ist in Abb. 3.13 qualitativ dargestellt. Diese Spannungen führen in Verbindung mit den in der Kontaktzone herrschenden Temperaturen, die im Bereich der Fließspanbildung über 1000°C betragen können, zu Verformungen mit Scherdehnungen $\bar{\epsilon}$ zwischen 0,8 und 4,0 und Scherdehnungsgeschwindigkeiten $\dot{\bar{\epsilon}}$ von bis zu 10^6 s^{-1} . Zum Größenvergleich sind in Abb. 3.13 die entsprechenden Werte des Zugversuchs angegeben. Für Schnittbedingungen, unter denen Hartmetall-Werkzeuge arbeiten, ergeben sich für die Deformation und das Aufheizen des Werkstoffs Zeiten in der Größenordnung von Millisekunden; die Aufheizgeschwindigkeiten liegen theoretisch bei 10^6 °C/s [Opit70].

3.4.2 *Verschiedene Arten der Spanbildung*

Wenn eine Spanbildung grundsätzlich sichergestellt ist, kann sie in verschiedenen Arten auftreten. ERNST [Erns38, Erns41] teilte Spanbildungsarten phänomenologisch ein. Kennzeichnend für eine Fließspanbildung ist ein gleichmäßig verformtes Werkstoffgefüge des Spanes, dessen Ursache in zeitlich sehr gleichmäßigen Reibungsverhältnissen zwischen Span und Werkzeug vermutet wird.

Für eine Lamellenspanbildung ist ein ungleichmäßig verformtes Werkstoffgefüge charakteristisch, dessen Ursache durch zeitlich stark veränderte Reibungsverhältnisse zwischen Span und Werkzeug (Ruckgleiten), bzw. durch dynamische Spannungsübertragung erklärt wird [Scha64]. Im Spangefüge sind lokal erhöhte Gefügeverformungen, Scherbänder, erkennbar, die für diese Spanbildung kennzeichnend sind.

Die Frequenzen der durch das Ruckgleiten hervorgerufenen Schwingungen liegen im Kilohertzbereich und haben geringe Amplituden. Die starken lokalen Gefügeverformungen werden dadurch erklärt, dass die thermisch bedingte Werkstofffestigung größer ist als deren mechanische Verfestigung. Die Forschungen über die genannten Phänomene gehen auf ZENER und HOLLOMON zurück, die zu deren Beschreibung beigetragen haben und den Begriff der Scherbänder prägten. Scherbänder treten bei der Zerspanung von Werkstoffen mit hoher Festigkeit und großem Formänderungsvermögen auf. Besonders häufig sind sie auch bei der Zerspanung mit hohen Schnittgeschwindigkeiten zu beobachten [Hopp03].

Wenn der Spannungszustand in der Scherzone die Verformungsfähigkeit des Werkstoffes überschreitet (Scherfestigkeit), kommt es zur Trennung von Werkstoffbereichen, die anschließend wieder miteinander verschweißen. Dieses führt zur Scherspanbildung. Diese kann als ein Spezialfall der Lamellenspanbildung

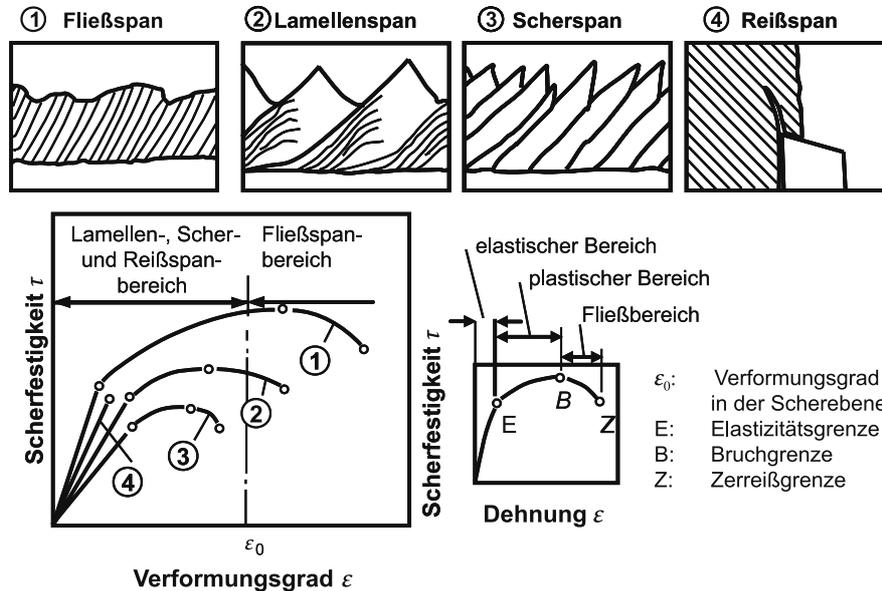


Abb. 3.14 Spanarten in Abhängigkeit von den Werkstoffeigenschaften, nach Vieregge [Vier70]

aufgefasst werden, bei der ebenfalls stark lokalisierte Verformungen (Scherbänder) auftreten.

Zusätzlich zu Schwingungen wird das gesamte System bestehend aus Werkzeugmaschine, Werkzeug, Werkstück und Spanmitteln von weiteren dynamischen Effekten wie z. B. dem Regenerativeffekt oder der Lagekopplung beeinflusst [Weck77]. Die Frequenzen dieser Effekte liegen wesentlich niedriger, im Bereich von tausend Hertz. Im Gegensatz zu der höherfrequenten Spanbildungsdynamik beeinflussen diese Schwingungen weniger die Spanbildung im Sinne von Werkstoffverformungen im Span, als die Spanbildung von außen, da sie die Ursache dynamischer Veränderungen des nominellen Vorschubes sind.

SCHWERD führte mikrokineatographische Versuche durch und schlug den Begriff des „Reißspanes“ vor [Schw36]. Grundsätzlich unterscheidet sich dieser Vorgang von den anderen Spanbildungsvorgängen dadurch, dass hier keine plastische Formänderung bis zum Bruch erfolgt, sondern der Bruch ohne plastische Formänderung stattfindet. Reißspäne sind grundsätzlich bei Werkstoffen mit sehr spröden Eigenschaften zu beobachten, wie z. B. Gusseisen, Gestein, Faserverbundwerkstoffen oder Titanaluminiden.

Abbildung 3.14 zeigt zusammenfassend die im Prinzip auftretenden Spanarten [Vier70].

- Fließspäne entstehen, wenn der Werkstoff eine ausreichende Verformungsfähigkeit besitzt ($\varepsilon_B > \varepsilon_0$), das Gefüge im Spanbereich gleichmäßig ist, die Verformung keine Versprödungserscheinungen hervorruft, und die Spanbildung nicht durch Schwingungen beeinträchtigt wird.

- Lamellenspäne entstehen, wenn $\varepsilon_B < \varepsilon_0 < \varepsilon_Z$ gilt oder das Gefüge ungleichmäßig ist oder Schwingungen zu Schwankungen der Spanungsdicke führen. Lamellenspäne können sowohl bei hohen Vorschüben als auch bei hohen Schnittgeschwindigkeiten entstehen.
- Scherspäne bestehen aus Spanteilen, die in der Scherebene getrennt werden und wieder zusammenschweißen. Sie bilden sich, wenn $\varepsilon_Z < \varepsilon_0$ gilt, wobei dies nicht nur bei spröden Materialien wie Gusseisen der Fall ist, sondern auch dann, wenn die Verformung Versprödungen im Gefüge hervorruft. Scherspäne können auch bei extrem niedrigen Schnittgeschwindigkeiten ($v_c = 1\text{--}3\text{ m/min}$) entstehen.
- Reißspäne entstehen meist beim Zerspanen von spröden Werkstoffen mit ungleichmäßigem Gefüge, wie einige Arten von Gusseisen und Gestein. Die Späne werden nicht abgetrennt, sondern von der Oberfläche abgerissen, wodurch die Werkstückoberfläche häufig durch kleine Ausbrüche beschädigt wird.

Die Abb. 3.15 gibt werkzeugseitig einen Überblick über das dynamische System mehrfach ineinander geschachtelter und gegenseitig rückwirkender Wirkungskreise, das die Ursache für die verschiedenen Spanbildungsarten bildet. Dieses System wird stark durch die Geschwindigkeitsfelder, die zu bearbeitenden Werkstoffe, die Werkzeuggeometrie und die Verfahrenskinetik beeinflusst.

Auf die niederfrequenten dynamischen Effekte seitens der Werkzeugmaschine wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen, sondern es wird auf die weiterführende Literatur verwiesen [Kron54, Opit70, Weck77, Alti00]

Ein Verfahren, mit dem die Spanbildung direkt beobachtbar wird, ist die Mikrokinematographie, deren erste Anwendungen auf den Zerspanungsvorgang bereits von Kurrein und später dann von Klopstock durchgeführt wurden [Kurr05, Klop23, Klop26], vgl. Abb. 3.16.

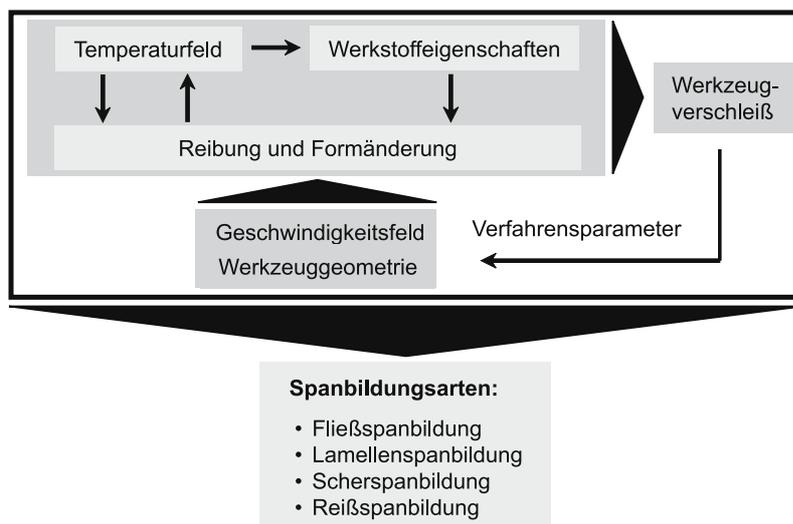


Abb. 3.15 Beeinflussung der Spanbildung

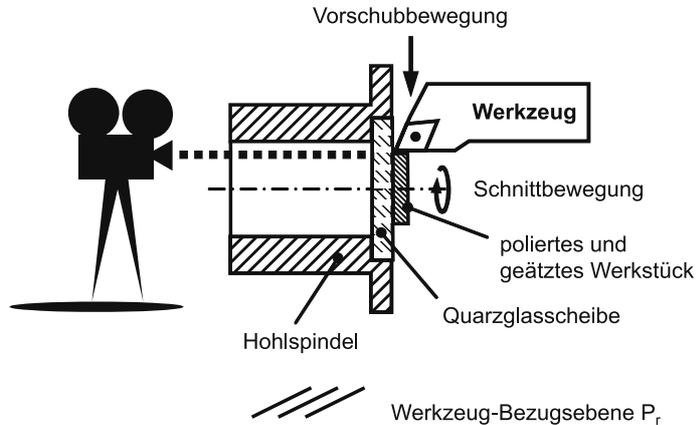


Abb. 3.16 Mikrokinematographie

Die Entwicklung dieses Verfahrens wurde im Laufe der Zeit von verschiedenen Forschern vorangetrieben [Schw36, Merc45, Oxle59, Spaa71, Warn74]. Bei dieser Methode wird die Spanbildung durch eine Quarzscheibe beobachtet, indem in kurzen Abständen nacheinander Fotos oder Filme aufgenommen werden. Ein Nachteil dieser Vorgehensweise ist die Beschränkung auf die Verwirklichung von sehr geringen Schnittgeschwindigkeiten ($v_c = 1 \text{ cm/min}$). Trotzdem sind hiermit grundsätzliche Phänomene erklärbar.

Heute stehen Hochgeschwindigkeitskameras zur Verfügung, mit denen 150.000 Bilder pro Sekunde aufgenommen werden können. Damit können die Phänomene bei höheren Geschwindigkeiten oder insbesondere bei der Mikrozerspanung im unteren Grenzbereich sichtbar gemacht werden.

Um die Spanbildung besser studieren zu können, sind verschiedene Methoden zur Schnittunterbrechung entwickelt worden, bei denen Spanwurzeln während des Zerspanungsprozesses „in statu nascendi“ festgehalten werden, die nach anschließender metallographischer Präparation Aufschluss über die Spanbildung geben. Bei den verwendeten Apparaturen wird das Werkzeug plötzlich aus dem Schnitt heraus beschleunigt. Die Beschleunigung wird bei diesen Apparaturen durch eine Sollbruchstelle an der Schwenkeinrichtung erreicht, die während des Zerspanungsprozesses auf Grund eines Impulses, der durch eine Explosion hervorgerufen wird, bricht [Lola49], Abb. 3.17. In jüngerer Zeit hat Gente eine Methode entwickelt, bei der die Verzögerungszeit und die bewegten Massen gegenüber der „Explosionsmethode“ reduziert werden konnten [Gent02] (vgl. ebenfalls Abb. 3.17). Dadurch sind Spanwurzeluntersuchungen auch bei höheren Schnittgeschwindigkeiten möglich.

Andere Verfahren wurden entwickelt, bei denen durch eine definierte Sollbruchstelle im Werkstück (Spröbruch) eine Spanwurzel erzeugt wird [Buda68], Abb. 3.18. Vorteilhaft ist, dass die Spanwurzel von dem Werkstück getrennt wird, und somit die Wirkstelle bei der anschließenden metallographischen Präparation geschont werden kann.

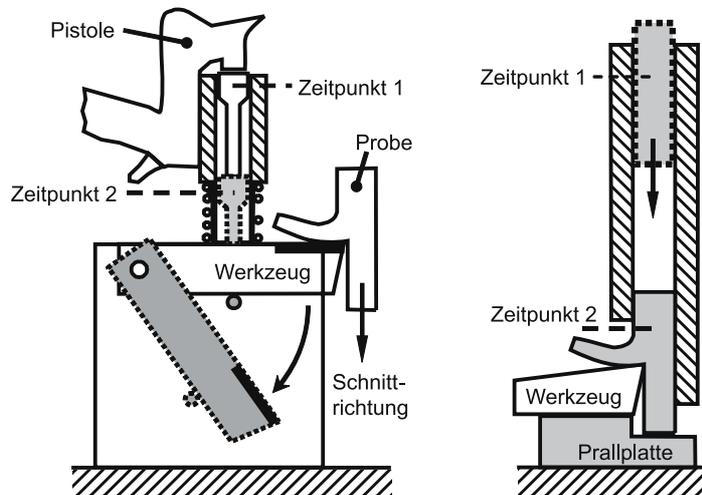


Abb. 3.17 Schnittunterbrechung nach Loladse [Lola49] (links) und Gente [Gent02] (rechts)

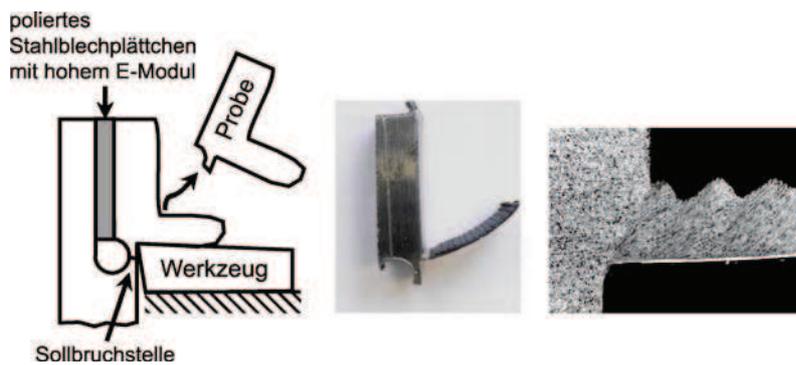


Abb. 3.18 Schnittunterbrechung durch eine Sollbruchstelle im Werkstück, nach Buda [Buda68]

3.5 Kinematische Oberflächenrautiefe

Mit Durchdringungsrechnungen zwischen Werkzeug und Werkstück können wichtige Grundinformationen über den Zerspanvorgang gewonnen werden. Hierzu gehören z. B. bei sich ändernden Eingriffsbedingungen die zugehörigen Spannungsquerschnitte, siehe auch Zahnradfertigung, oder auch mikrogeometrische Oberflächenkennwerte. Im Folgenden ist die Erzeugung der Oberflächengüte beispielhaft für einen einfachen Außenrund-Drehprozess gezeigt. Da Spanbildungsvorgänge außer Acht gelassen werden, spricht man in diesem Fall von dem Erzeugen der kinematischen Oberflächenrautiefe. Dazu wird die Durchdringung des Werkstücks durch das Werkzeug – unter Berücksichtigung der Kinematik in der Werkzeug-Bezugsebene P_r – geometrisch ausgewertet, Abb. 3.19.

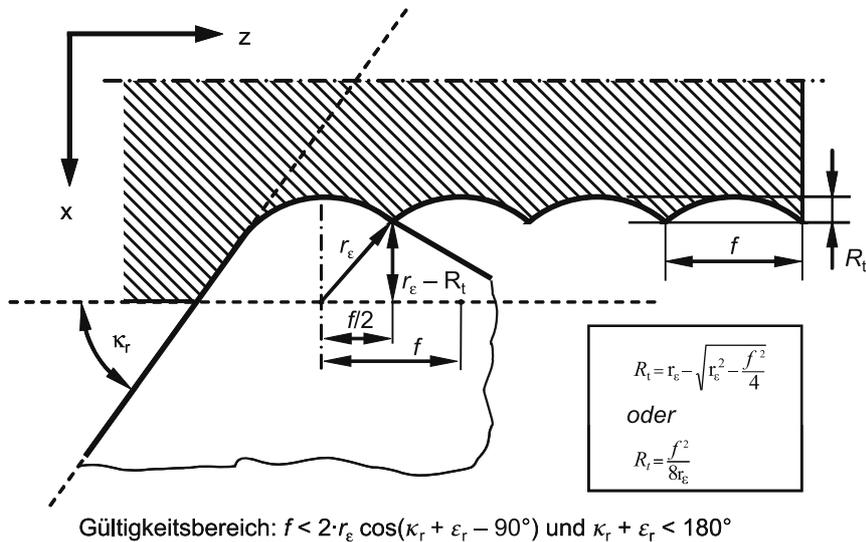


Abb. 3.19 Geometrische Eingriffsverhältnisse beim Drehen

3.6 Mechanische und thermische Beanspruchung des Schneidteils

Die Zerspankraft F , hier beispielhaft beim Drehen dargestellt, lässt sich in ihre Komponenten – die Schnittkraft F_c , die Vorschubkraft F_f und die Passivkraft F_p – zerlegen, Abb. 3.20. Die messtechnische Erfassung der Zerspankraftkomponenten erfolgt heute üblicherweise mit Hilfe von piezoelektrischen Kraftaufnehmern.

Grundlage für die Bestimmung der an der Werkzeugschneide angreifenden Kräfte stellt die von Merchant [Merc45, Merc45a] für den Orthogonalschnitt abgeleitete Kräftezerlegung dar, Abb. 3.21.

Unter Annahme einer idealscharfen Schneide und unter Vernachlässigung des Freiflächenverschleißes können aus den Kraftkomponenten die auf das Werkzeug wirkende Tangentialkraft $F_{\gamma T}$ und Normalkraft $F_{\gamma N}$ berechnet werden. Sofern der Neigungswinkel $\lambda_s = 0^\circ$ beträgt und der Einfluss der Nebenschneide gering ist, gilt:

$$F_{\gamma N} = F_c \cos \gamma_0 - (F_f \sin \kappa_r + F_p \cos \kappa_r) \sin \gamma_0 \quad (3-1)$$

$$F_{\gamma T} = F_c \sin \gamma_0 + (F_f \sin \kappa_r + F_p \cos \kappa_r) \cos \gamma_0 \quad (3-2)$$

wobei der Klammerausdruck in den Gln. 3-1 und 3-2 der Normalkraft zur Hauptschneide $F_{\kappa N}$ entspricht, Abb. 3.21. Wegen des in den meisten Fällen geringen Unterschiedes zwischen den Winkeln im Werkzeugbezugssystem und im Wirkbezugssystem wird vereinfachend im Werkzeugbezugssystem gerechnet.

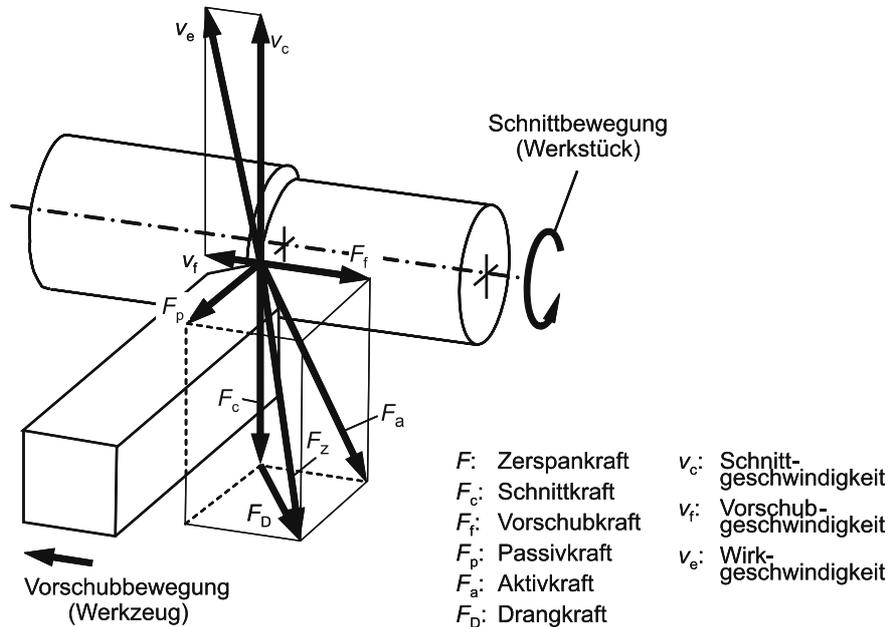


Abb. 3.20 Zerspankraft und ihre Komponenten beim Drehen, nach DIN 6584

Für den Fall $\gamma_0 = 0^\circ$ wirken die Schnittkraft F_c und die Vorschubkraft F_f senkrecht bzw. tangential zur Spanfläche. Im Gegensatz zur Originalarbeit von Merchant wurde für die Darstellung in Abb. 3.22 ein neutraler Spanwinkel ($\gamma_0 = 0^\circ$) gewählt, und die Kräfte mit Wirkrichtung auf die Werkzeugschneide dargestellt. Die Bezeichnung der angreifenden Kräfte und ihrer Vorzeichen orientiert sich an den Normen ISO 3002/4 und DIN 6584.

Wie Abb. 3.22 für den einfachsten Fall, den Orthogonalschnitt mit neutralem Spanwinkel, verdeutlicht, setzen sich am verschlissenen Werkzeug die Schnitt- und Vorschubkraft nicht nur aus der Spanflächen-Normalkraft $F_{\gamma N}$ und der Spanflächen-Tangentialkraft $F_{\gamma T}$, sondern auch aus der an der Freifläche im Bereich der Verschleißzone angreifenden Freiflächen-Tangentialkraft $F_{\alpha T}$ sowie der Freiflächen-Normalkraft $F_{\alpha N}$ zusammen. In dem Reibungskoeffizienten, der sich aus der Schnitt- und Vorschubkraft berechnen lässt, steckt somit nicht nur die Spanflächenreibung, sondern auch die z. B. infolge der elastischen Verformung der Werkstückoberfläche und des Werkzeugverschleißes an der Freifläche angreifenden Kräfte [Klau65]. Wie Untersuchungen zeigen, beträgt die Freiflächen-Normalkraft ca. 40% der Vorschubkraft und damit ca. 66% der Spanflächenkomponente in Vorschubrichtung [Spaa67, Lutz68]. Für die Freiflächen-Tangentialkraft wurde ein Anteil von ca. 10% der Schnittkraft F_c ermittelt.

Die aus den auf die Spanfläche wirkenden Zerspankraftkomponenten resultierenden mittleren Normal- und Tangentialspannungen liegen bei der Zerspannung von Baustählen zwischen 350 und 400 N/mm² bzw. 250 und 350 N/mm² [Köni72].

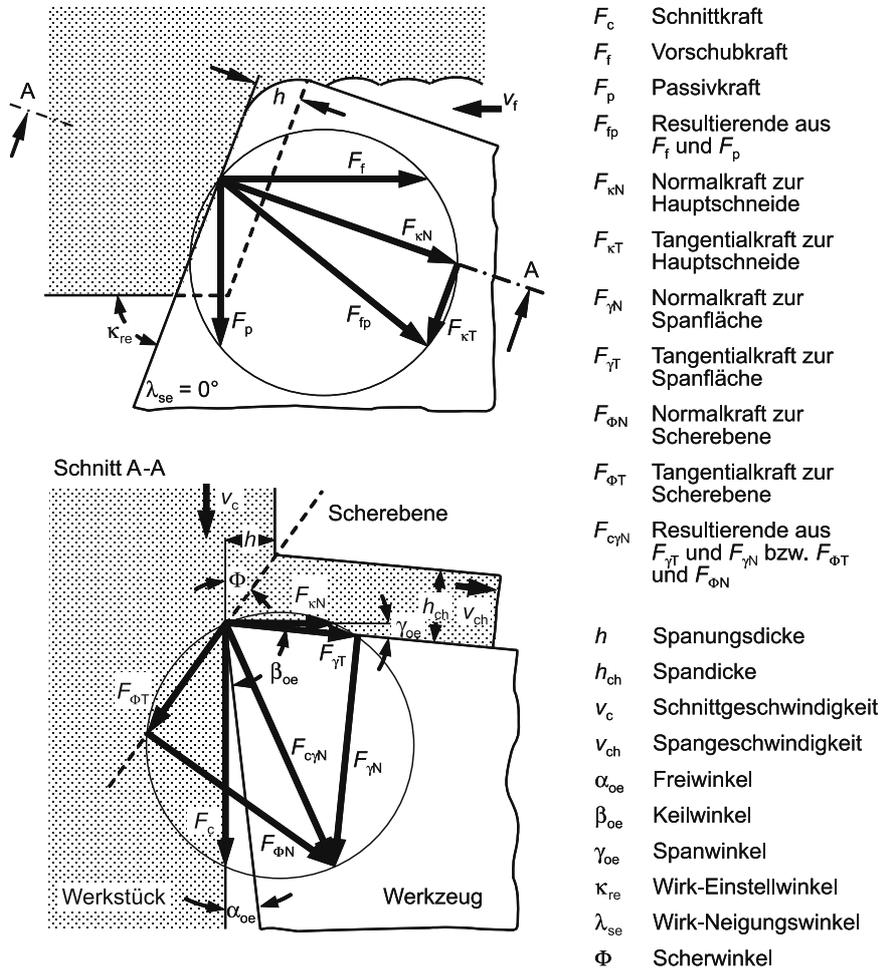
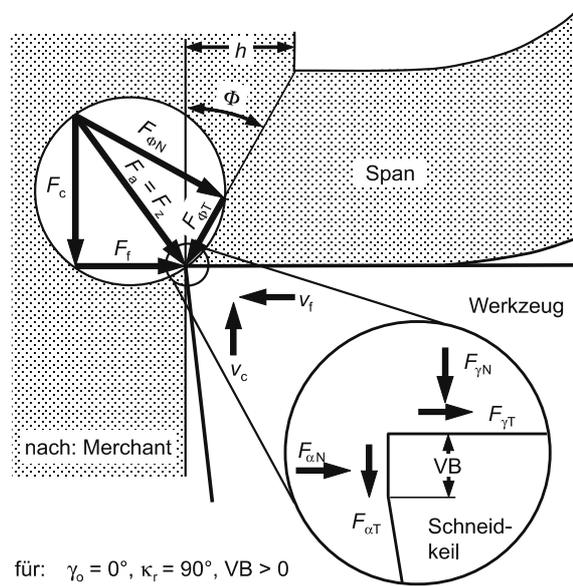


Abb. 3.21 Komponenten der Zerspangkraft in der Wirkbezugsebene (oben) und in der Arbeitsebene (unten)

Für schwer zerspanbare Werkstoffe erreichen sie Werte von 1100 N/mm^2 . Ihr Verlauf ist in Abb. 3.13 qualitativ wiedergegeben. Größe und Richtung der Zerspangkraft werden in starkem Maße durch die angewendeten Schnittbedingungen und Schneidteilgeometrien beeinflusst. In Abb. 3.23 ist die Abhängigkeit der statischen Zerspangkraftkomponenten F_c , F_f und F_p vom Vorschub f , der Schnittgeschwindigkeit v_c , der Schnitttiefe a_p und dem Einstellwinkel κ_r qualitativ im linearen Koordinatensystem dargestellt.

Abb. 3.22 Die mechanische Belastung der Werkzeug-schneide resultiert beim Drehen aus den an Span- und Freifläche angreifenden Normal- und Tangentialkräften und ihren Komponenten, nach Merchant [Merc45, Merc45a]



für: $\gamma_o = 0^\circ, \kappa_r = 90^\circ, VB > 0$
 gilt: $|F_c| = |F_{\gamma N}| + |F_{\alpha T}|$
 $|F_f| = |F_{\gamma T}| + |F_{\alpha N}|$

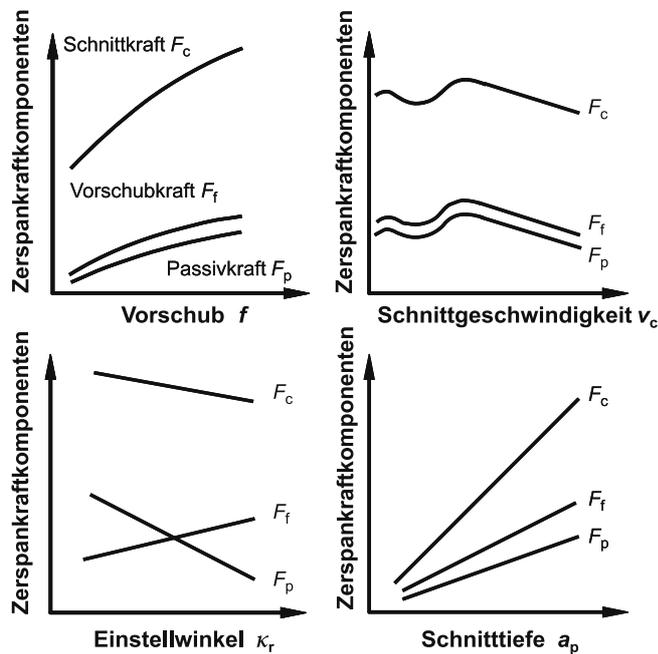


Abb. 3.23 Abhängigkeit der Zerspankraftkomponenten von Vorschub, Schnittgeschwindigkeit, Einstellwinkel und Schnitttiefe (qualitativ)

Einflussgrößen		Änderung der Zerspankraftkomponenten je Grad Winkeländerung		
		Schnittkraft F_c	Vorschubkraft F_f	Passivkraft F_p
abnehmend ↓	Spanwinkel	↑ 1,5 %	↑ 5,0 %	↑ 4,0 %
	Neigungswinkel	↑ 1,5 %	↑ 1,5 %	↑ 10,0 %
zunehmend ↑	Spanwinkel	↓ 1,5 %	↓ 5,0 %	↓ 4,0 %
	Neigungswinkel	↓ 1,5 %	↓ 1,5 %	↓ 10,0 %

Abb. 3.24 Einfluss des Span- und Neigungswinkels auf die Zerspankraftkomponenten

Die Extremwerte bei den Verläufen der Zerspankraftkomponenten über der Schnittgeschwindigkeit sind auf die Aufbauschneidenbildung zurückzuführen. Die Abnahme der Kräfte mit steigender Schnittgeschwindigkeit hat ihre Ursache in der Abnahme der Festigkeit des Werkstoffs bei höheren Temperaturen. Die Zerspankraftkomponenten steigen über der Schnitttiefe a_p proportional an. Dies gilt jedoch nur, wenn die Schnitttiefe größer als der Eckenradius des Werkzeugs ist. Der Verlauf der Vorschubkraft F_f und Passivkraft F_p über dem Einstellwinkel κ_r ergibt sich aufgrund der geometrischen Lage der Schneidkante zur Werkstückachse, da mit größerem Einstellwinkel die in Vorschubrichtung weisende Komponente der Zerspankraft zunimmt, und bei $\kappa_r = 90^\circ$ ihr Maximum erreicht. Wird der Einstellwinkel vergrößert, so erhöht sich die Spannungsdicke h im gleichen Maß wie die Spannungsbreite b abnimmt. Da die Schnittkraft F_c über der Schnitttiefe a_p ($\hat{=}$ Spannungsbreite b) proportional ist, aber über dem Vorschub ($\hat{=}$ Spannungsdicke h) aber degressiv ansteigt, resultiert aus beiden Veränderungen eine leichte Abnahme von F_c bei steigendem κ_r .

Abbildung 3.24 gibt einige Richtwerte an, wie sich die Zerspankraftkomponenten ändern, wenn der Spanwinkel oder der Neigungswinkel variiert werden. Diese Angaben können jedoch stark schwanken und sind nur als Anhaltswerte zu sehen.

Eine Veränderung des Freiwinkels im Bereich von $3 \leq \alpha_o \leq 12^\circ$ hat keine nennenswerten Auswirkungen auf die Zerspankraftkomponenten. Ebenso zeigt eine Änderung des Eckenradius keinen wesentlichen Einfluß auf die Kräfte, solange die Bedingung $2r \leq a_p$ erfüllt ist.

Der Werkzeugverschleiß (s. Kap. 3.7) stellt eine weitere Einflussgröße auf die Zerspankräfte dar. In Abhängigkeit von der Art des Verschleißes lässt sich hierbei unterschiedliche Wirkungen auf die Zerspankraftkomponenten feststellen.

Kolkverschleiß, der einen größeren positiven Spanwinkel zur Folge hat, führt in der Regel zu einem Absinken der Zerspankräfte. Bei vorherrschendem Freiflächenverschleiß dagegen steigen die Kräfte an, da die Reibfläche zwischen Werk-

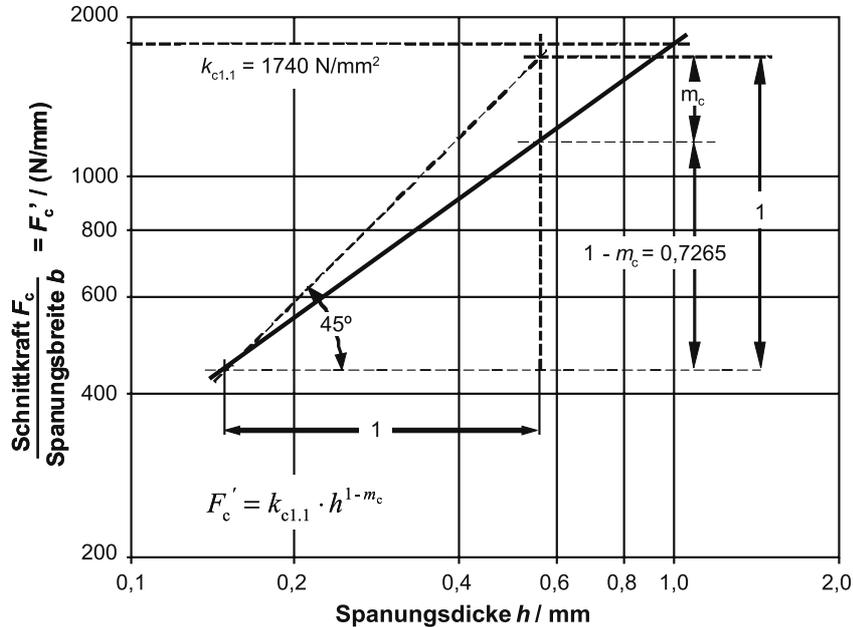


Abb. 3.25 Graphische Ermittlung der Kennwerte $k_{c1.1}$ und $(1-m_c)$

stück und Freifläche größer wird. Eine quantitative Aussage über den Kraftanstieg mit zunehmendem Werkzeugverschleiß ist wegen der Vielzahl der Einflussgrößen nur näherungsweise möglich. Als Anhaltswert für den Kraftanstieg bis zu einer Verschleißmarkenbreite von $VB=0,5$ mm können überschlägig angenommen werden: für die Vorschubkraft F_f rd. 90%, für die Passivkraft F_p rd. 100% und für die Schnittkraft F_c rd. 20%.

Es lassen sich mehrere spezifische Kennwerte zur Berechnung der Zerspankraftkomponenten unterscheiden. Die Zerspankraftkomponenten sind direkt proportional zu der Spannungsbreite b . Um empirische Gesetze erkennen zu können, empfiehlt es sich meistens, den Messwert auf bereits bekannte, linear abhängige Größen zu beziehen, um somit die Anzahl der in die Gesetzmäßigkeit eingehenden Variablen zu verringern. In diesem Falle bildet man den Quotienten F'_c aus der Schnittkraft F_c und der Spannungsbreite b . Trägt man nun die so gefundenen Werte im doppelt-logarithmischen System über der Spannungsdicke h auf, so ordnen sich die Messpunkte auf einer Geraden an, Abb. 3.25.

Die entsprechende Geradengleichung

$$\log(F_c/b) = \log(k_{c1.1}) + (1-m_c) \cdot \log h \quad (3-3)$$

lässt sich in die Kienzle-Gleichung überführen:

$$F'_c = k_{c1.1} \cdot h^{(1-m_c)} \quad (3-4)$$

Die spezifische Schnittkraft $k_{c1,1}$ gibt die Schnittkraft an, die zum Abspannen eines Spans der Spannungsbreite $b = 1$ mm und der Spannungsdicke $h = 1$ mm erforderlich ist. Der Exponent $(1-m_c)$ bezeichnet die Steigung der Geraden $F_c' = f(h)$ im doppelt-logarithmischen System.

Zur Ermittlung von $k_{c1,1}$ und $(1-m_c)$ werden für die zu untersuchenden Werkstoff-Schneidstoff-Paarungen Zerspanungsversuche durchgeführt, bei denen für mehrere Vorschübe die zugehörigen Schnittkräfte bei konstanter Schnittgeschwindigkeit, Schnitttiefe und Schneidteilgeometrie gemessen und entsprechend Abb. 3.25 aufgetragen werden. Durch Extrapolation der Spannungsdicke auf $h = 1$ mm wird der gesuchte spezifische Schnittkraftkennwert $k_{c1,1}$ ermittelt. Der Tangens des Winkels zwischen den Geraden und der x-Achse ist der gesuchte Anstiegswert $(1-m_c)$.

Für die Zerspankraftkomponenten F_f und F_p lassen sich entsprechende Gleichungen und Kennwerte definieren:

$$F_f' = k_{f1,1} \cdot h^{(1-m_f)} \quad (3-5)$$

$$F_p' = k_{p1,1} \cdot h^{(1-m_p)} \quad (3-6)$$

Die so ermittelten Werte sind allerdings nur für Spannungsdicken $h > 0,1$ mm gültig. Werte für k_c und $(1-m)$ sind in [Köni82] zu finden.

Die Energie zum Zerspanen bzw. die Arbeit beim Zerspanen ergibt sich nach DIN 6584 als Produkt aus den zurückzulegenden bzw. zurückgelegten Wegen und den in ihrer Richtung wirkenden Komponenten der Zerspankraft. Entsprechend ergeben sich die Leistungen beim Zerspanen als Produkt aus den Geschwindigkeitskomponenten und den in ihrer Richtung wirkenden Komponenten der Zerspankraft.

Schnittarbeit W_c und Schnittleistung P_c :

$$W_c = l_c \cdot F_c \quad (3-7)$$

$$P_c = v_c \cdot F_c \quad (3-8)$$

Vorschubarbeit W_f und Vorschubleistung P_f :

$$W_f = l_f \cdot F_f \quad (3-9)$$

$$P_f = v_f \cdot F_f \quad (3-10)$$

Unter Wirkarbeit W_e und Wirkleistung P_e ist die Summe aus den entsprechenden Schnitt- und Vorschubanteilen zu verstehen:

$$W_e = W_c + W_f \quad (3-11)$$

$$P_e = P_c + P_f \quad (3-12)$$

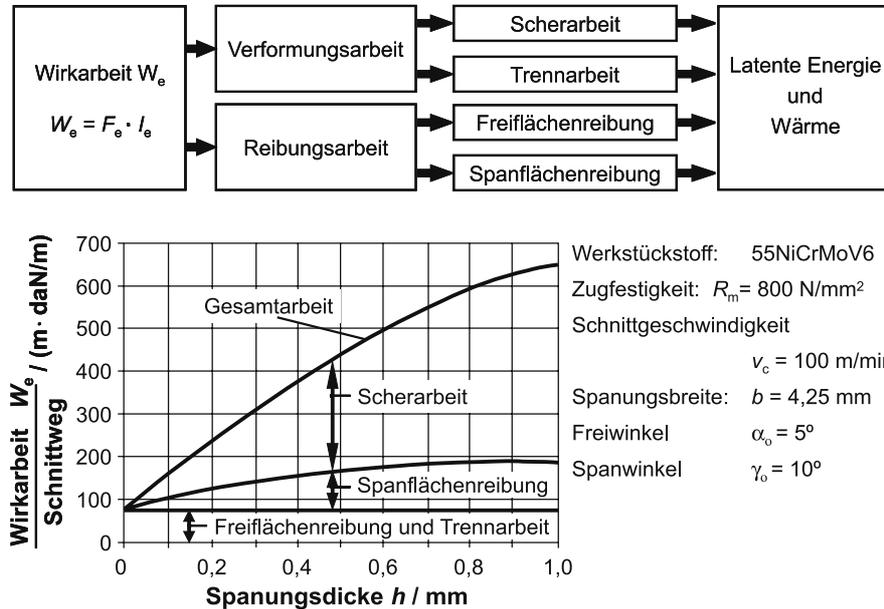


Abb. 3.26 Aufteilung der Wirkarbeit beim Zerspanen in Abhängigkeit von der Spanungsdicke, nach Vieregg [Vier59, Vier70]

Wegen der relativ kleinen Vorschubgeschwindigkeiten und Vorschubwege beträgt die Vorschubarbeit bzw. die Vorschubleistung beim Drehen nur etwa 0,03–3% der entsprechenden Schnitтарbeit oder Schnittleistung. Es kann deswegen in den meisten Fällen $W_e \approx W_c$ und $P_e \approx P_c$ gesetzt werden.

Abbildung 3.26 bietet einen Überblick über die Aufteilung der Gesamtzerspanarbeit in Scher-, Trenn- und Reibungsarbeit in Abhängigkeit von der Spanungsdicke [Vier70]. Aus dem Bild geht hervor, dass die Anteile der verschiedenen Arbeiten von der Spanungsdicke abhängen, wobei die Scherarbeit bei großen Spanungsdicken den wichtigsten Anteil darstellt.

Die für die Zerspanung aufgewendete mechanische Wirkarbeit wird fast vollständig in Wärmeenergie umgewandelt. Da die Wärmezentren mit den Verformungszentren identisch sind, kommen als Wärmequellen die Scherzone und die Reibzonen am Werkzeug in Betracht. Wie Abb. 3.13 zeigt, ist der Verformungsgrad in der Fließzone an der Spanunterseite wesentlich höher als in der Scherzone, so dass zwischen Span und Werkzeug die höchsten Temperaturen zu erwarten sind. Da die Dicke der Fließzone jedoch im Vergleich zur Scherzone sehr gering ist, sind die höheren Temperaturen nicht auch einem höheren Energieumsatz gleichzusetzen.

Die Darstellung in Abb. 3.27 links gibt Aufschluss über die Wärmemengen, die von Werkstück, Span und Werkzeug aufgenommen bzw. abgeführt werden. Der größte Teil der Wärme wird vom Span abgeführt. Der Hauptanteil der mechani-

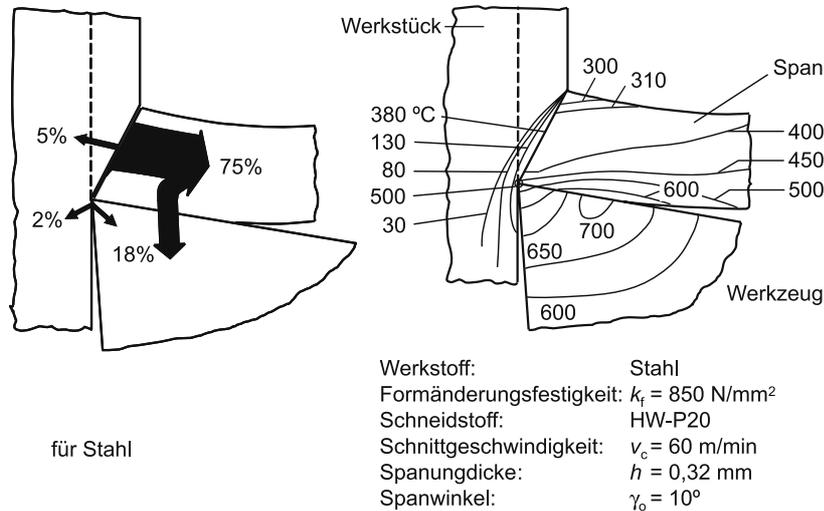


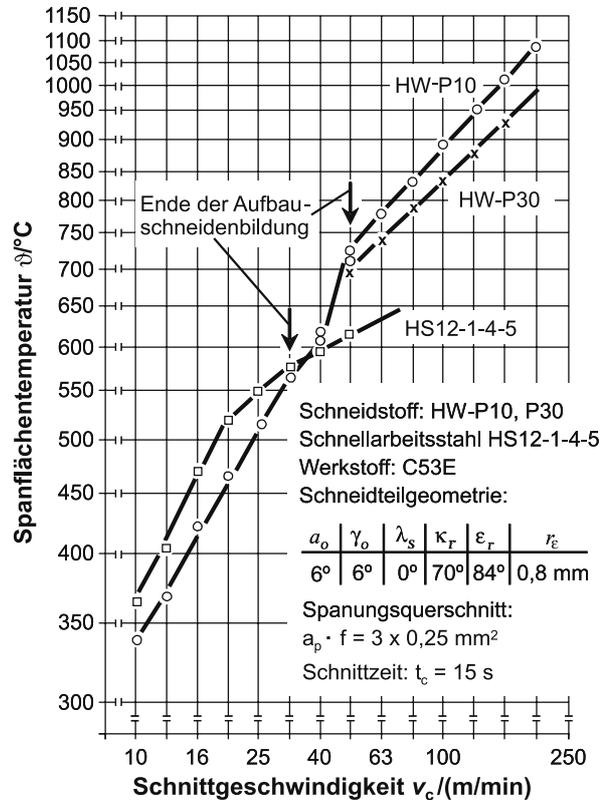
Abb. 3.27 Wärme- und Temperaturverteilung in Werkstück, Span und Werkzeug bei der Stahlzerspanung, nach Kronenberg [Kron54] und Vieregge [Vier59]

schen Energie (in diesem Fall 75% und i. Allg. mehr als 50%) wird in der Scherzone umgesetzt. Die an den einzelnen Entstehungsstellen anfallenden Wärmemengen werden durch Wärmeleitung, Strahlung und Konvektion an die Umgebung abgeführt. Als Folge dieser Wärmebilanz bilden sich im Werkstück und Werkzeug entsprechende Temperaturfelder aus, die sich solange verändern, bis ein Gleichgewicht zwischen zu- und abgeführten Wärmemengen erreicht ist. Ein solches Temperaturfeld ist im rechten Bildteil gezeigt.

Betrachtet man ein Materialteilchen in der Trennzone, so wird seine Temperatur mindestens gleich der eines Teilchens in der Scherzone sein. Beim weiteren Gleiten über die Kontaktzone wird das Material an der Spanunterseite und das Werkzeug an der Spanfläche stark aufgeheizt, weil die zur Überwindung der Reibung zwischen Span und Spanfläche erforderliche Energie fast vollständig in Wärme umgesetzt wird. Da dieser Vorgang nur in Grenzschichten des Span- und Schneidstoffvolumens stattfindet, heizt er die Spanfläche und die Spanunterseite umso stärker auf, je weniger Zeit infolge hoher Schnittgeschwindigkeiten für die Wärmeableitung zur Verfügung steht. Die maximale Temperatur tritt nicht direkt an der Schneidkante, sondern je nach Schnittbedingungen in einem gewissen Abstand von ihr auf der Spanfläche auf.

Die Ermittlung der beim Zerspanen auftretenden Temperaturen war schon sehr früh Gegenstand intensiver Forschungsarbeiten [Gott25, Lang49, Schm53, Küst54, Vier55, Küst56, Axer55]. Bereits 1956 wies Küsters beim Zerspanen von Stahl mit Hartmetall auf der Spanfläche Temperaturen von mehr als 1000°C nach [Küst56]. Spätere Untersuchungen haben diese Ergebnisse immer wieder qualitativ bestätigt [Cass94, Denk90, Ehme70a, Lenz66, Laus88, Beye72, Dama90, LoCa94]. Die

Abb. 3.28 Mittlere Spanflächentemperaturen



Höhe der am Schneidteil wirkenden Temperaturen ist abhängig vom zerspannten Werkstoff, vom Schneidstoff, von den gewählten Schnittbedingungen, vom Werkzeugverschleiß und vom Kühlmedium. Einen Eindruck von der Größenordnung der auf der Spanfläche zu erwartenden mittleren Zerspanntemperaturen gibt in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit für verschiedene Schneidstoffe, Abb. 3.28. Im Bereich $v_c = 20\text{--}50 \text{ m/min}$ erfolgt der Temperaturverlauf im doppelt-logarithmischen Koordinatensystem nicht linear. Der Grund hierfür ist die in diesem Schnittgeschwindigkeitsbereich auftretende Aufbauschneidenbildung (s. Abschn. 3.7.2), die die direkte Wärmeleitung stört.

Im Vergleich zur Spanfläche liegen in der Regel an der Freifläche die Temperaturen auf einem niedrigeren Niveau (Abb. 3.29) [Denk90, Ehme70a, Axer55, Laus88, Beye72, Dama90]. Die Größe der sich zwischen Spanfläche und Freifläche einstellenden Temperaturdifferenz, die nach [Ehme70a] für das Zerspannen mit Hartmetallwerkzeugen bei ca. $200\text{--}300^\circ\text{C}$ liegt, wird sehr stark von der Lage der Kontaktzone auf der Spanfläche mitbestimmt. Je näher diese an die Schneidkante rückt, um so mehr gleichen sich die an Span- und Freifläche herrschenden Temperaturen an. Dies bedeutet, dass insbesondere bei der Schlichtbearbeitung mit hohen Schnittgeschwindigkeiten und kleinen Vorschüben auch im Bereich der Freifläche

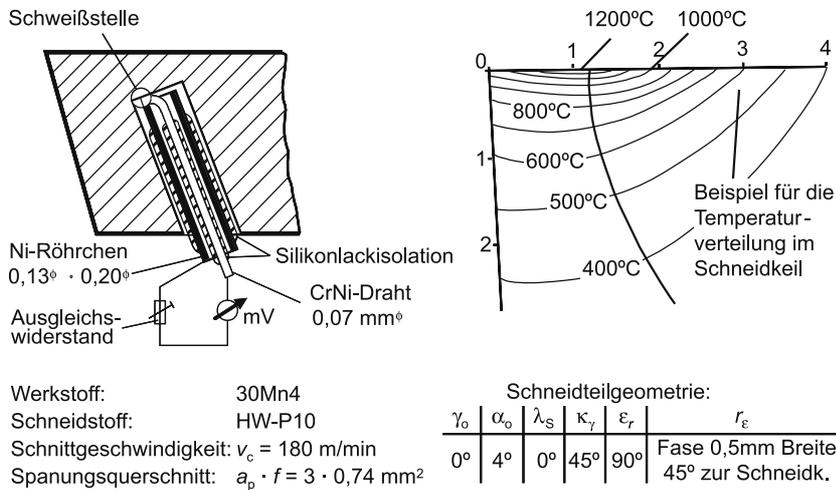


Abb. 3.29 Temperaturmessung mit eingebautem Thermoelement an Hartmetall, nach Küsters [Küst56]

sehr hohe Temperaturen vorliegen. Nach Angaben in der Literatur [Ehme70a, Vier53, Schm53, Küst54, Vier55, Küst56, Axer55, Beye72] können in Abhängigkeit von den gewählten Randbedingungen beim Zerspanen mit Hartmetallwerkzeugen an der Freifläche Temperaturen von mehr als 800°C auftreten.

Für die Temperaturmessung während des Zerspanungsvorgangs stehen verschiedene Verfahren und Geräte zur Verfügung, Abb. 3.30 [Lowa67]. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der Messtechnik, des experimentellen Aufbaus und der Messposition. Für Temperaturmessungen während des Zerspanvorganges kommen ausschließlich die zeitauflösenden Messtechniken in Betracht, da für andere Methoden, wie zum Beispiel das Beschichten mit temperaturempfindlichen Farben oder Pulver mit konstantem Schmelzpunkt, die Prozessdauer bei der Zerspanung und somit das Erreichen eines thermisch stationären Zustands zu kurz ist. Von den in Abb. 3.30 aufgeführten Verfahren sind die Ein- und Zweimeißelmethode, die Temperaturmessung mit Thermoelement, Pyrometer und Thermokamera technisch interessant.

Als erste direkte Verfahren zur Temperaturmessung wurden von Gottwein das Einmeißelverfahren und in Zusammenarbeit mit Reichel das Zweimeißelverfahren entwickelt [Gott25, Herb26, Vier70]. Beide Verfahren beruhen auf dem Prinzip eines Thermoelements. Werkzeug und Werkstück bilden die Warmlötstellen, die Werkstückeinspannung ist die Kaltlötstelle eines Thermoelements. Werkstück und Werkzeug müssen isoliert eingespannt werden, da die in der Kontaktzone zwischen der Schneidplatte und dem Span entstehende Thermospannung sonst über die Maschine im Kurzschluss abgebaut würde. Daher muss auch eine Berührung des ablaufenden Spans mit dem Werkstück außerhalb der Kontaktzone vermieden werden. Beide Verfahren erfordern elektrisch leitende Werk- und Schneid-

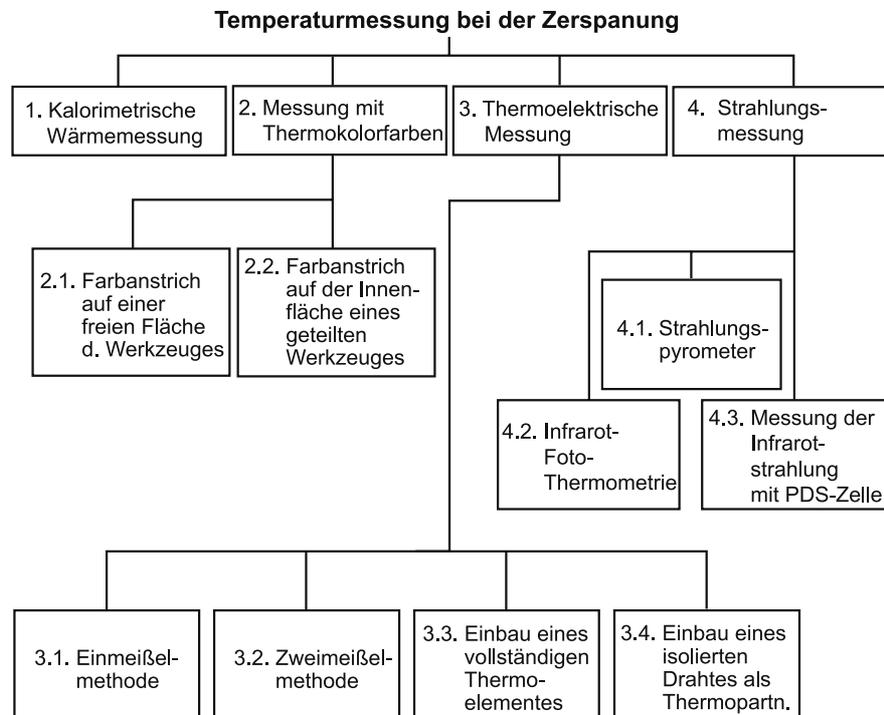
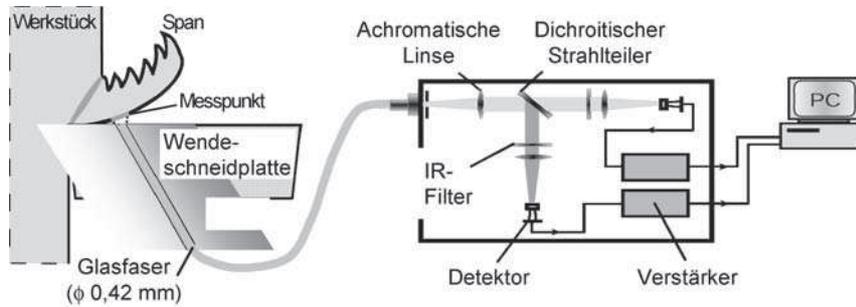


Abb. 3.30 Verfahren zur Temperaturmessung beim Zerspanen

stoffe. Bei dem Zweimeißelverfahren müssen Schneidstoffe mit unterschiedlichen thermoelektrischen Eigenschaften eingesetzt werden. Als nachteilig erweist sich vor allem bei dem Einmeißelverfahren der langwierige und aufwendige Eichprozess des Thermoelements, der für jede Schneidstoff-Werkstoff-Kombination erneut durchzuführen ist. Mit diesen Verfahren sind Temperaturen bis 1200°C bestimmbar.

Zu den heute gebräuchlichsten Techniken zählt die Temperaturmessung mit Hilfe von Thermoelementen. Durch den Einbau eines Thermoelements in Werkzeug oder Werkstück lässt sich das Temperaturfeld punktwise bestimmen, Abb. 3.29. Bei den eingefügten Thermoelementen wird zwischen gekapselten Thermopaaren, Mantelthermoelementen und so genannten Eindrahtthermoelementen unterschieden. Thermopaare können in Sacklochbohrungen im Werkzeug [Küst56, Qure66, Abra97] oder im Werkstück appliziert werden [Osul02]. Die zeitliche Auflösung wird von der Ansprechzeit des Thermoelements und dem Wärmeübergang zwischen Thermoelement und Messobjekt beeinflusst. Grundsätzlich besitzen diese Techniken eine geringe zeitliche Auflösung. Problematisch ist des Weiteren der Kontaktwärmübergangswiderstand zwischen Messoberfläche und Thermoelement, bedingt durch die Rauheit der Bohrung. Dieser verursacht einen Temperaturunterschied zwischen Messoberfläche und Thermoelement. Hin-



Merkmale

- Messung zweier diskreter Wellenlängenbänder $\lambda_1 = 1,7 \mu\text{m}$ und $\lambda_2 = 2 \mu\text{m}$, die ins Verhältnis gesetzt werden.
- Hohes zeitliches Auflösungsvermögen (ca. $2 \mu\text{s}$).
- Unabhängigkeit vom Emissionsgrad (keine Kalibrierung erforderlich).
- Großer Temperaturmessbereich ($250\text{--}1200 \text{ }^\circ\text{C}$).
- Berührungslose Messtechnik.

Abb. 3.31 Prinzipieller Aufbau eines 2-Farben Pyrometers, nach Müller [Müll85]

zesse. Einige Hochgeschwindigkeits-Infrarotkameras bieten Integrationszeiten im Mikrosekundenbereich, was Aufnahmen von schnellen Prozessen ohne Bewegungsunschärfe ermöglicht.

Ein wesentliches Problem bei der messtechnischen Erfassung der Schneidentemperaturen liegt neben der schlechten Zugänglichkeit in dem begrenzten örtlichen Auflösungsvermögen der verfügbaren Messverfahren und dem nur wenige Mikrometer breiten Bereich, innerhalb dem die maximalen Temperaturen auftreten. Auch die in der Grenzfläche zwischen Schneidstoff und ableitendem Span bestehenden lokalen Temperaturunterschiede können mit den bisherigen Messverfahren nicht erfasst werden. Erfolgversprechende Ansätze, die thermische Werkzeugbelastung genauer als bisher zu bestimmen, stellen Sensoren in Dünnschichttechnik dar, die in die Werkzeugkontaktzonen appliziert, während des Zerspanvorganges die Temperaturverteilung innerhalb der Kontaktzonen erfassen [Zieb95, Töns95, Kloc97]. Für Schnittprozesse mit hohem Verschleiß ist diese Technik bislang allerdings nicht geeignet. Eine weitere viel versprechende Methode zur Bestimmung der in den Grenzflächen zwischen Werkstoff und Schneidstoff herrschenden Temperaturen ist die Implantation eines Fensters aus Diamant in der Werkzeugkontaktzone. Die von der Spanunterseite ausgesandte Wärmestrahlung gelangt durch das Fenster über einen im Meißelhalter integrierten Spiegel zu einer Infrarotkamera [Müll96].

Der direkte Vergleich der von den verschiedenen Autoren gemessenen Temperaturen ist nur selten möglich, da die Versuchsbedingungen in der Regel voneinander abweichen. Es existieren zahlreiche Parameter, die sich auf die Temperaturen auswirken: Art des Zerspanprozesses, Werk- und Schneidstoffe, mögliche Beschichtungen der Schneidstoffe, die Verwendung von Kühlschmierstoffen

und Zerspanparameter wie Vorschub, Schnittgeschwindigkeit, Schnitttiefe und Schneidteilgeometrie. Außerdem ist die Messposition ausschlaggebend und messtechnische Parameter wie lokale bzw. zeitliche Auflösung. Auch die Dauer des Schnittvorgangs und der Zeitpunkt der Messung müssen berücksichtigt werden.

Den größten Einfluss auf die Maximaltemperaturen, die in der Kontaktzone zwischen Span und Werkzeug auftreten, hat eindeutig die Schnittgeschwindigkeit. Bei dem prinzipiellen Verlauf zeigen die meisten Messungen einen deutlichen Anstieg der Temperaturen bei niedrigen bis mittleren Schnittgeschwindigkeiten, während sich ein näherungsweise konstantes Niveau bei hohen Geschwindigkeiten einstellt.

3.6.1 Einfluss der Geometrie des Schneidteils

Je nach Zerspanungsaufgabe wählt man sehr unterschiedliche Geometrien des Schneidteils. Die Wahl dieser Geometrie hängt ab von

- dem Schneidstoff,
- dem Werkstoff,
- den Schnittbedingungen und
- der Werkzeuggeometrie.

Übliche Größenordnungen der Werkzeugwinkel bei der Stahlzerspanung sind in Abb. 3.32 angegeben. Jede Festlegung von Werkzeugwinkeln ist eine Kompromisslösung, die den verschiedenen Anforderungen nur annähernd gerecht werden kann.

Abbildung 3.33 zeigt, in welcher Weise eine Veränderung der Schneidteilgeometrie die Zerspanungskenngrößen beeinflusst.

Schneidteil- geometrie Schneidstoff	Spanwinkel γ_o	Freiwinkel α_o	Neigungs- winkel λ_s	Einstell- winkel κ_r	Eckenwinkel ϵ_r	Eckenradius r_ϵ
Schnellarbeitsstahl (HSS)	-6° bis +20°	6° bis 8°	-6° bis +6°	10° bis 100°	60° bis 120°	0,4 bis 2 mm
Hartmetall	-6° bis +15°	6° bis 12°				

Abb. 3.32 Werkzeugwinkel bei der Stahlzerspanung

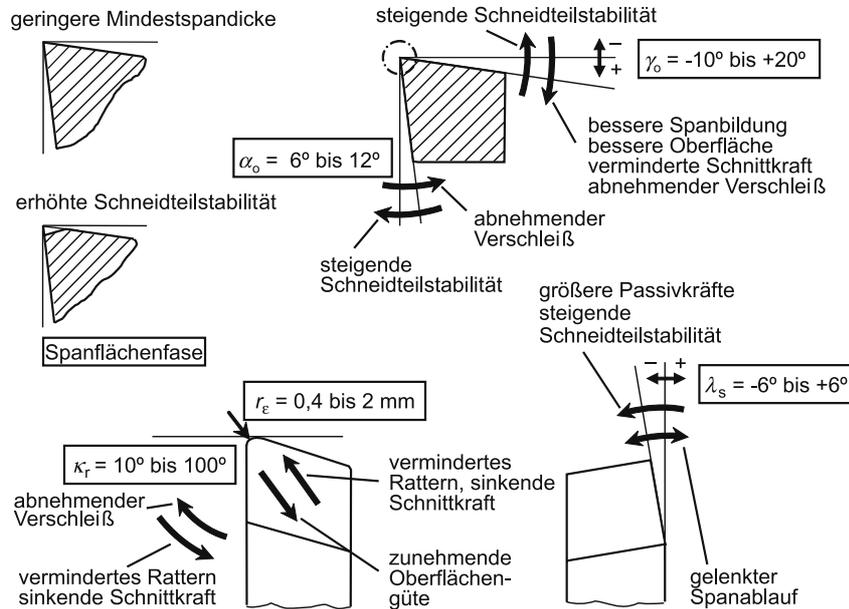


Abb. 3.33 Einfluss der Schneidengeometrie auf die Zerspanungskenngrößen

3.6.1.1 Freiwinkel α_0

Der Verschleiß an der Freifläche (gekennzeichnet durch die Verschleißmarkenbreite VB) wird wesentlich durch die Größe des Freiwinkels bestimmt. Ist dieser groß, wird der Schneidteil in zweifacher Hinsicht geschwächt: Im Werkzeug kann ein Wärmestau entstehen, der möglicherweise die Beeinträchtigung oder den Verlust der Warmhärte zur Folge haben kann; ein zu kleiner Keilwinkel erhöht außerdem die Ausbruchgefahr der Schneidkante. Geht $\alpha_0 \rightarrow 0^\circ$, so nimmt der Flächenverschleiß zu, da verstärkt Pressschweißungen an den Kontaktstellen der Reibpartner auftreten.

3.6.1.2 Spanwinkel γ_0 , Keilwinkel β_0

Der Spanwinkel γ_0 kann im Gegensatz zu α_0 im positiven wie im negativen Bereich liegen. Er ist für die Trennung des zu zerspanenden Materials verantwortlich. Die Größe des Spanwinkels γ_0 beeinflusst die Stabilität des Schneidkeils wesentlich; daher können stark positive Spanwinkel infolge erhöhter Schneidteil-schwächung zum Bruch des Werkzeugs führen. Als Vorteile eines positiven Spanwinkels sind in erster Linie die geringen Schnitt- und Vorschubkräfte sowie meist verbesserte Werkstückoberflächen zu nennen. Der durch einen positiven Spanwinkel begünstigte Spanablauf bedingt jedoch oft eine nur ungenügende Spanbrechung (Neigung zur Fließspanbildung). Negative Spanwinkel erhöhen die

Schneidenstabilität (Anwendung z. B. beim Hobeln und bei der Bearbeitung von Werkstücken mit Durchbrüchen, Walz- oder Gusshaut.) Die dabei verstärkte Verformung des ablaufenden Spans und die großen Schnittkräfte haben eine starke Temperaturbelastung des Schneidteils zur Folge. Es entsteht ein erhöhter Kolkverschleiß auf der Spanfläche, der zu niedrigen Standzeiten der Werkzeuge führen kann. Spanwinkel γ_0 und Freiwinkel α_0 bilden zusammen mit dem Keilwinkel β_0 einen rechten Winkel (Abb. 3.8)

3.6.1.3 Eckenwinkel ε

Wegen der bei extremen Schnittbedingungen erwünschten Werkzeugstabilität sollte der Eckenwinkel ε möglichst groß sein. Kleine Eckenwinkel werden besonders bei der Kopier- und NC-Bearbeitung benötigt. Der mögliche Bereich ist dadurch eingengt, dass die Lage der Hauptschneide vorgegeben ist und der Winkel zwischen Nebenschneide und Vorschubrichtung mindestens 2° betragen soll, um ein Nachschaben der Nebenschneide am Werkstück zu vermeiden.

3.6.1.4 Einstellwinkel κ_r

Bei konstantem Vorschub und konstanter Schnitttiefe steigt mit kleiner werdendem κ_r die Spanungsbreite b an. Dadurch sinkt die spezifische Schneidenbelastung, so dass kleine Einstellwinkel speziell bei der Zerspannung von Werkstoffen mit hoher Festigkeit eingesetzt werden, um so die Werkzeugbelastung bzw. den Verschleiß gering zu halten. Andererseits nimmt die Passivkraft F_p mit kleiner werdendem κ_r zu und damit die Gefahr, dass aufgrund wachsender Instabilität des Zerspanprozesses Ratterschwingungen auftreten.

3.6.1.5 Neigungswinkel λ_s

Durch einen negativen Neigungswinkel kann der Zerspanungsvorgang weitgehend stabilisiert werden, weil der Anschnitt des Werkzeugs nicht an der Schneidenecke sondern in Richtung Schneidenmitte erfolgt. Dadurch ergibt sich ein günstigerer Belastungsverlauf, so dass die Gefahr des Schneidenbruchs infolge örtlicher Überlastung gemindert wird. Die Problematik des belastungsarmen Anschnitts gewinnt insbesondere bei unterbrochenen Schnitten (z. B. beim Fräsen, Hobeln) sowie bei der Bearbeitung von Guss- und Schmiedeteilen (Werkstücke mit Querbohrungen, Lunker) an Bedeutung.

Negative Neigungswinkel rufen große Passivkräfte hervor, die von den Werkzeugmaschinen aufgenommen werden müssen (Steifigkeit senkrecht zur Hauptspindel!).

Der Neigungswinkel hat weiterhin einen Einfluss auf die Spanabflussrichtung. Ein negativer Neigungswinkel kann zur Folge haben, dass der Span auf die Werkstückoberfläche abgelenkt wird und es damit zu einer Verschlechterung der Oberflächengüte kommt.

3.6.1.6 Eckenradius r_e

Der zu wählende Eckenradius des Schneidteils hängt vom Vorschub f und der Schnitttiefe a_p ab. Im Zusammenhang mit dem gewählten Vorschub beeinflusst er wesentlich die erreichbare Werkstückoberflächengüte (s. Abschn. 7.2.3), wobei annähernd die Beziehung gilt:

$$R_t = \frac{f^2}{8r_e} \quad (3-13)$$

Große Eckenradien bewirken eine verbesserte Werkstückoberfläche und Schneidenstabilität, kleine Eckenradien haben den Vorteil einer geringen Ratterneigung aufgrund der kleineren Passivkräfte.

3.7 Verschleiß

Während des Zerspanprozesses finden im Bereich der Schneide Verformungs-, Trenn- und Reibvorgänge statt. Dabei unterliegen die eingesetzten Schneidstoffe einem außerordentlich komplexen Belastungskollektiv, das durch hohe Druckspannungen, hohe Schnittgeschwindigkeiten und hohe Temperaturen gekennzeichnet ist.

Unter Anwendung der in der Praxis üblichen Schnittbedingungen erreichen Zerspanwerkzeuge in der Regel durch einen kontinuierlich zunehmenden Verschleiß an Span- und Freifläche ihr Einsatzende. Man versteht hierunter den fortschreitenden Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d. h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers.

3.7.1 Verschleißmechanismen

Die Hauptmechanismen, die den Verschleiß verursachen, sind Adhäsion, Abrasion, tribochemische Reaktionen und Oberflächenzerrüttung (Abb. 3.34)

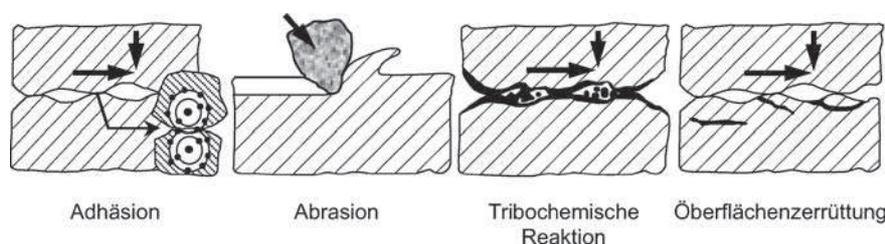


Abb. 3.34 Schematische Darstellung der vier Hauptverschleißmechanismen, nach Zum Gahr [ZumG92]

3.7.1.1 Abrasion

Abrasion tritt auf, wenn Rauheitshügel des Gegenkörpers oder Partikel, die als Zwischenstoff oder ebenfalls als Gegenkörper vorhanden sind, in die Oberflächenbereiche des Schneidstoffes eindringen und gleichzeitig eine Tangentialbewegung ausführen, so dass Riefen und Mikrospäne gebildet werden. Die unterschiedlichen Abrasionsformen werden als Furchungs-, Spül-, Mahl-, Kerb- oder Strahlverschleiß bezeichnet. Häufig wird der Begriff „Furchungverschleiß“ synonym mit dem Begriff „abrasiver Verschleiß“ verwendet [Habi80, Czic06].

Beim Furchungverschleiß dringen harte Rauheitshügel oder harte Partikel in die Oberflächenbereiche des beanspruchten Werkstoffes ein und erzeugen durch Gleitbewegung Riefen bzw. Furchen. Der Verschleiß kann hierbei durch einen rauen, kompakten Gegenkörper (Gegenkörperfurchung) oder durch lose Partikel bei Gleitbeanspruchung (Teilchenfurchung) verursacht werden.

Der Vorgang der Werkstoffschädigung kann in Mikropflügen, Mikrospanen und Mikrobrechen unterteilt werden (Abb. 3.35). Mikropflügen und Mikrospanen sind die vorherrschenden abrasiven Verschleißvorgänge bei duktilen Werkstoffen. Beim Mikropflügen wird der Werkstoff innerhalb der Verschleißfurche plastisch verformt und zu den Furchungsrändern verdrängt. Im Idealfall tritt kein Materialabtrag auf. Er kann jedoch dann erfolgen, wenn durch gleichzeitige Wirkung vieler abrasiver Teilchen oder durch die mehrfache Wirkung eines einzelnen Teilchens der Werkstoff wiederholt zu den Furchungsrändern verdrängt wird und schließlich durch Ermüdung versagt. Ideales Mikrospanen führt zu einem Materialabtrag in Form eines Spanes, dessen Volumen gleich dem Volumen der entstehenden Verschleißfurche ist. Bei spröden Werkstoffen kommt das Mikrobrechen noch hinzu. Materialteilchen entstehen hierbei durch Rissbildung und Rissausbreitung in der beanspruchten Oberfläche. Das Volumen der beim Mikrobrechen entstehenden Verschleißteilchen ist mehrfach größer als das der durchgehenden Verschleißfurche [ZumG87, ZumG92, Habi80].

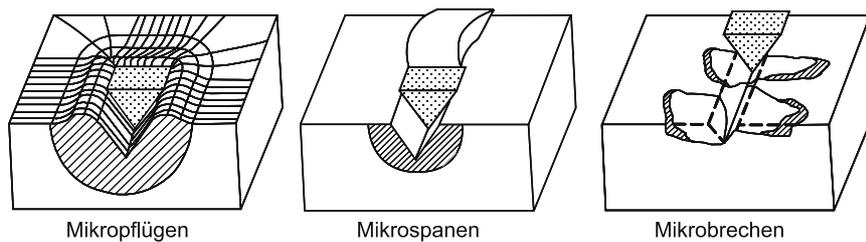


Abb. 3.35 Arten der Werkstoffschädigung durch abrasive Teilchen, nach Zum Gahr [ZumG87]

3.7.1.2 Adhäsion

Adhäsion wird als die Ausbildung von Grenzflächen-Haftverbindungen definiert. Man versteht hierunter einen Verschleißmechanismus, bei welchem in der Kontaktfläche zwischen Werkstoff und Schneidstoff atomare Bindungen, z. B. in Form

von Mikroverschweißungen, entstehen, die während einer tangentialen Bewegung der Reibpartner verformt, verfestigt und abgeschert werden [Erin90, ZumG87].

Der Vorgang der Adhäsion, d. h. die Ausbildung von Mikroverschweißungen zwischen zwei Reibpartnern, kann sowohl durch atomare Wechselwirkungen (chemische Adhäsion) zwischen den Partnern, wie thermisch induzierte Diffusionsvorgänge, Elektronenaustausch oder elektrische Polarisierung als auch durch ein mechanisches Verhaken (mechanische Adhäsion) des bei hohen Temperaturen extrem plastisch verformbar gewordenen Werkstückstoffes mit dem Schneidstoff zustande kommen [Tell93].

Durch Adhäsion können Partikel von einem Verschleißpartner auf den anderen übertragen werden. Ist dieser Übertrag primäre Ursache des Verschleißes, so spricht man auch von adhäsivem Verschleiß, obwohl an der Bildung loser Verschleißpartikel in der Regel noch andere Verschleißmechanismen beteiligt sind [Habi80].

Das Adhäsionsverhalten ist eine Paarungseigenschaft, die von den Eigenschaften des Grund- und Gegenkörpers abhängt. Ob ein Werkstoff zur Adhäsion neigt, kann nur in Abhängigkeit vom Werkstoff des Gegenkörpers beantwortet werden, mit dem er starke, schwache oder keine Adhäsionsbindungen eingeht [Habi80].

Die Stärke einer Adhäsionsverbindung wird durch den Adhäsionskoeffizienten beschrieben. Dieser ist definiert als Quotient aus der Normalkraft F_N , mit der zwei Festkörper unter Verdrehung aufeinandergespreßt werden und der entgegengesetzt wirkenden Kraft F_A , die aufgebracht werden muss, um die hierbei durch Adhäsion entstandene Verbindung zu lösen [Habi80, Andr59, Siko63].

Die Neigung von Festkörpern, Adhäsionsverbindungen einzugehen, kann mit Hilfe ihrer Oberflächenenergie beurteilt werden. Ein Verfahren zur Bestimmung der Oberflächenenergie von Festkörpern stellt die Kontaktwinkelmessung dar. In [Bobz00] wird eine Messvorschrift beschrieben, die einen Vergleich der Oberflächenenergien von Schichtsystemen hinsichtlich ihrer polaren- und dispersiven Anteile ermöglicht. Da in erster Linie die polaren Anteile für die Adhäsionsneigung eines Feststoffes verantwortlich gemacht werden, sollte im Hinblick auf eine möglichst geringe Adhäsionsneigung, die Oberflächenenergie von Zerspanwerkzeugen, d. h. insbesondere die des aufgetragenen Schichtsystems, einen möglichst geringen polaren Anteil besitzen [Bobz00, Kloc05].

Bei der Spanbildung entstehen neue Werkstoffoberflächen, die in statu nascendi ohne Adsorptions- oder Reaktionsgrenzschichten, chemisch äußerst aktiv unter hohen Drücken und Temperaturen mit der Werkzeugoberfläche in Kontakt kommen und sich dieser bis auf Atomabstand nähern. Plastische Verformungsvorgänge führen zur Ausbildung großer realer Kontaktflächen. Der Zerspanvorgang bietet damit sehr günstige Voraussetzungen für das Auftreten adhäsiv bedingter Wechselwirkungen [Bömc89, Neis94, Erin90].

3.7.1.3 Tribooxidation

Unter dem Begriff „Tribooxidation“ werden chemische Reaktionen von Schneidstoff und Werkstoff mit Bestandteilen des Zwischenstoffes oder des Umgebungs-

mediums infolge reibbedingter Aktivierung zusammengefasst. Durch die Tribooxidation verändern sich die Eigenschaften der äußeren Grenzschicht. Es können Reaktionsprodukte entstehen, die mit dem Span abgeführt werden oder als Belag auf dem Schneidstoff haften bleiben. Der Verschleiß kann dadurch erhöht oder reduziert werden. Ob die Tribooxidation einen höheren Verschleißbeitrag verursacht, hängt entscheidend von der Härte der gebildeten Reaktionsprodukte im Verhältnis zur Härte des Schneidstoffes ab. Eine Abnahme ist vor allem auch dann möglich, wenn die Reaktionsschichten einen unmittelbaren metallischen Kontakt von Grund- und Gegenkörper verhindern, so dass die Wirkung der Adhäsion eingeschränkt wird [Erin90, Habi80, Tel193].

3.7.1.4 Diffusion

Diffusion ist der thermisch aktivierte Platzwechsel einzelner Atome [Horn67]. Es handelt sich um einen temperaturabhängigen chemisch-physikalischen Prozess, bei dem das Eindiffundieren fremder Substanzen oder das Abdiffundieren eigener Bestandteile zur Herabsetzung der Verschleißfestigkeit des Schneidstoffes führen kann. Die Diffusion von Atomen aus den tribologisch beanspruchten Bereichen der Tribopartner führt einerseits zum unmittelbaren Materialverlust, der in der Regel sehr gering ist, als Verschleißbetrag aber durchaus auch messbar sein kann; viel gravierender kann aber die Herabsetzung der Verschleißfestigkeit von Zerspanwerkzeugen durch das Ein- oder Abdiffundieren bestimmter Legierungselemente sein. Das Abdiffundieren wesentlicher Legierungselemente kann zu einer Verminderung der Härte und damit zu einer Verringerung des Schneidstoffwiderstandes gegen Abrasion führen [Neis94, Erin90, Habi80].

Der Zerspanvorgang bietet aufgrund der hohen Drücke und Temperaturen in den Kontaktzonen gute Voraussetzungen für Diffusionsvorgänge zwischen Werkstoff und Schneidstoff. Diffusionsvorgänge können insbesondere beim Zerspanen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten und damit hohen Kontaktzonentemperaturen auftreten. Im Bereich der Kontaktzonen nähern sich Schneidstoff und Werkstoff bis auf Atomabstand an. Ferner ist ein Konzentrationsgefälle aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung von Schneidstoff und Werkstoff gegeben und bleibt werkstoffseitig aufgrund des ständig neu zugeführten Spanes auch erhalten [Neis94, Erin90].

3.7.1.5 Oberflächenzerrüttung

Oberflächenzerrüttung tritt bei tribologischen Wechselbeanspruchungen auf. In den belasteten Oberflächenbereichen führen wechselnde mechanische Beanspruchungen zu Gefügeveränderungen, Ermüdungs-, Rissbildungs- und Risswachstumsvorgängen bis hin zur Abtrennung von Verschleißpartikeln [Habi80].

Im Gegensatz zur Abrasion, bei der durch einen einzigen Beanspruchungsvorgang Verschleißpartikel gebildet werden können, geht der Oberflächenzerrüttung

in der Regel eine längere Inkubationszeit voraus, in der es nicht zu einem messbaren Verschleiß kommt. In dieser Zeit wird die Bildung von Verschleißpartikeln durch Gefügeveränderungen sowie Rissbildungs- und Risswachstumsvorgänge vorbereitet [Habi80].

3.7.2 Verschleißursachen

Die Reibvorgänge in den Kontaktzonen der Werkzeuge sind mit denen der trockenen Reibung im Vakuum vergleichbar. Zusammen mit außerordentlich hohen mechanischen und thermischen Beanspruchungen ergibt sich in der Regel eine schnelle Abnutzung des Werkzeugs [Rabi65, Krag71, Opit70a, Opit70b].

Nach dem heutigen Stand der Erkenntnisse kann man für den Sammelbegriff „Verschleiß“ folgende Einzelursachen angeben, Abb. 3.36:

- mechanischer Abrieb (Abrasion),
- Abscheren von Pressschweißstellen (Adhäsion)
- Beschädigung der Schneidkante infolge mechanischer und thermischer Überbeanspruchung,
- Diffusion,
- Verzunderung.

Die Vorgänge überlagern sich in weiten Bereichen und sind sowohl in ihrer Ursache als auch in ihrer Auswirkung auf den Verschleiß nur zum Teil voneinander zu trennen [Opit67, Köni65, Ehme70b, Ehme70c].

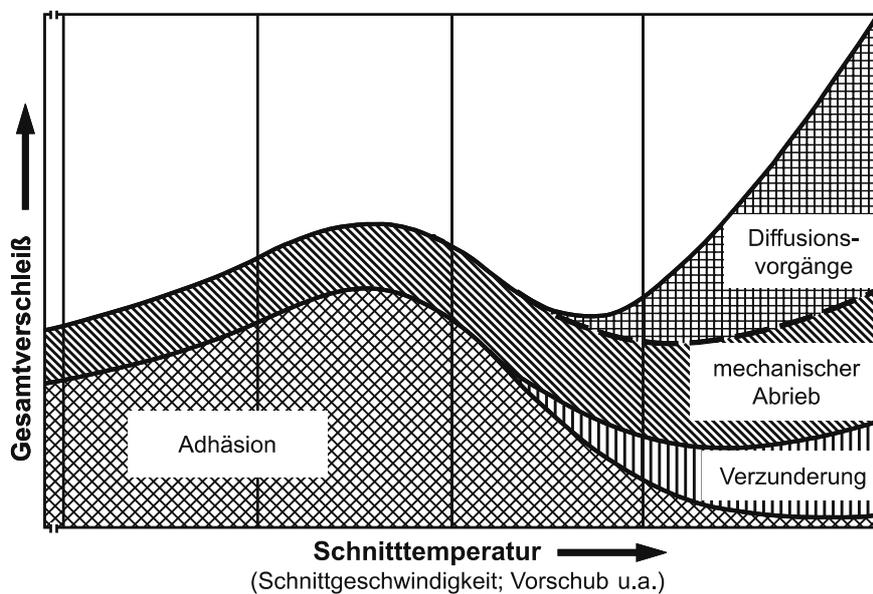


Abb. 3.36 Verschleißursachen bei der Zerspaltung

3.7.2.1 Mechanischer Abrieb (Abrasion)

Mechanischer Abrieb bzw. Abrasionsverschleiß tritt sowohl bei niedrigen wie auch bei hohen Schnittgeschwindigkeiten auf. Als dominierende Verschleißform kann hierbei der Furchungverschleiß in Form der Gegenkörper- oder Teilchenfurchung angesehen werden. Bei der Gegenkörperfurchung beruht die tribologische Beanspruchung des Schneidstoffes auf der abrasiven Wirkung harter Teilchen, die in der Kontaktfläche von Werkstück oder Span fixiert sind. Diese können aus dem Werkstückstoff stammen (Oxide, Carbide, Nitride) oder durch Adhäsion vom Schneidstoff auf Werkstück oder Spanunterseite übertragen worden sein. Bei der Teilchenfurchung verursachen lose Partikel den Verschleiß. Sie können direkt durch Abrasion (Mikrospanen, Mikrobrechen) oder Oberflächenzerrüttung entstanden sein. Es kann sich hierbei aber auch um Adhäsionspartikel oder Tribooxidationsprodukte handeln, die durch Abrasion oder Oberflächenzerrüttung abgetragen worden sind. Aufgrund der hohen Drücke und Temperaturen, die in den Kontaktzonen an Span- sowie Freifläche herrschen, ist zu vermuten, dass die entstandenen losen Verschleißpartikel in den vorbeigleitenden weicheren Gegenkörper eingedrückt werden und durch Gegenkörperfurchung zum weiteren Verschleiß beitragen.

Durch Abrasion oder Oberflächenzerrüttung an der Schneidkante oder in den Kontaktzonen an Span- und Freifläche aus dem Schneidstoff heraus gebrochene Schneidstoffpartikel gleiten unter hohem Druck über die Span- oder Freifläche ab. Dabei können sie durch Mikrospanen oder Mikrobrechen zum weiteren Verschleißfortschritt beitragen. Diesem auch als „Selbstverschleiß“ [Ehme70a] bezeichneten Vorgang kommt insbesondere im Hinblick auf die Ausbildung und Entwicklung des Freiflächenverschleißes eine wesentliche Bedeutung zu.

3.7.2.2 Abscheren von Pressschweißstellen (Adhäsion)

Beim Abscheren von Mikroverschweißungen kann die Materialtrennung in der Grenzfläche, innerhalb eines oder innerhalb beider Körper erfolgen. Von Adhäsionsverschleiß spricht man dann, sobald die Werkstofftrennung im Schneidstoff erfolgt. Auch für die Bildung und das Wachstum von Aufbauschneiden, bei denen Material vom zu zerspanenden Werkstoff auf das Zerspanwerkzeug übertragen wird, ist die Adhäsion verantwortlich [Erin90, Habi80, ZumG87].

Ferritische und austenitische Stahlwerkstoffe neigen sehr stark zur Adhäsion mit dem Schneidstoff. Der Grund hierfür ist vor allem in der guten plastischen Verformbarkeit dieser Werkstoffe zu sehen. Die große Duktilität der ferritischen Werkstoffe beruht vor allem auf deren relativ geringen Festigkeit, bei den austenitischen Stahlwerkstoffen auf deren kubisch-flächenzentriertem Kristallgitter.

Wolframkarbid, Träger der Härte und Verschleißfestigkeit in den konventionellen WC-Co-Hartmetallen, besitzt eine hexagonale Kristallstruktur, das Kristallgitter des Bindemetalls Kobalt ist dagegen oberhalb von 690 K kubisch-

flächenzentriert, besitzt also eine Adhäsionsvorgänge begünstigende Struktur. Die üblicherweise auf Hartmetallen abgeschiedenen Schichtsysteme auf Titan-Basis sind ebenfalls kubisch-flächenzentriert, woraus eine starke Adhäsionsneigung bei der Zerspanung austenitischer Stahlwerkstoffe resultiert. Die Verschleißformen, die aus dieser starken Adhäsionsneigung resultieren, können von Werkstoffverklebungen auf Span- und Freifläche bis hin zur Entschichtung beschichteter Werkzeuge im Bereich der Kontaktzone reichen.

Aufbauschneiden sind hochverfestigte Schichten des zerspanten Werkstoffs, die als Verklebungen auf dem Werkzeug die Funktion der Werkzeugschneide übernehmen. Ermöglicht wird diese Erscheinung durch die Eigenschaft bestimmter Werkstoffe, sich bei plastischer Verformung zu verfestigen. Der an der Schneide haftende Werkstoff wird durch den Spandruck verformt und gewinnt eine hohe Härte, die ihn befähigt, seinerseits die Funktion eines spanabhebenden Werkzeugs zu übernehmen.

Je nach Schnittbedingungen gleiten Aufbauschneideteilchen periodisch zwischen Freifläche und Schnittfläche ab. Sie führen bei hoher Härte und Ablösefrequenzen bis rd. 1,5 kHz zu einem erhöhten Freiflächenverschleiß und verschlechtern erheblich die Oberflächengüte des Werkstücks, Abb. 3.37. Da der Span über die Aufbauschneide und nicht über die Spanfläche abgeleitet wird, ist der Kolkverschleiß meist vernachlässigbar gering.

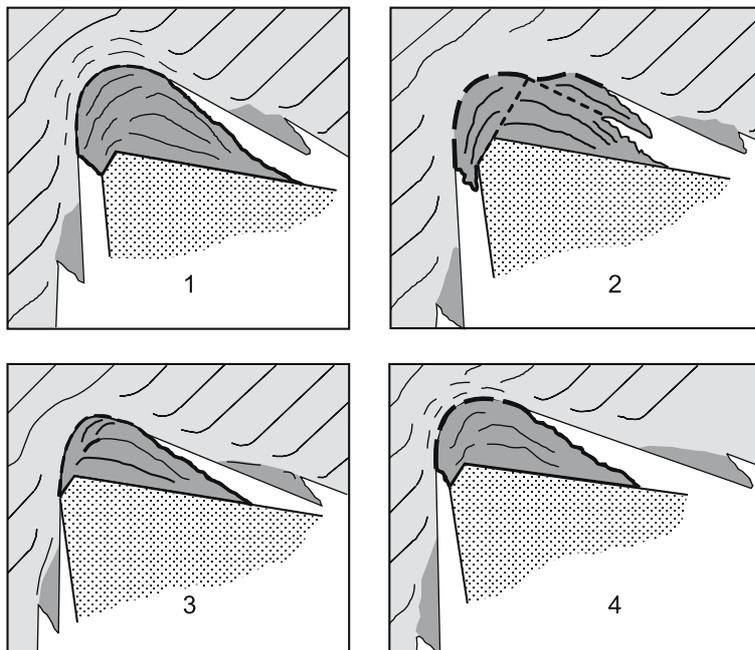


Abb. 3.37 Schema der periodischen Aufbauschneidenbildung

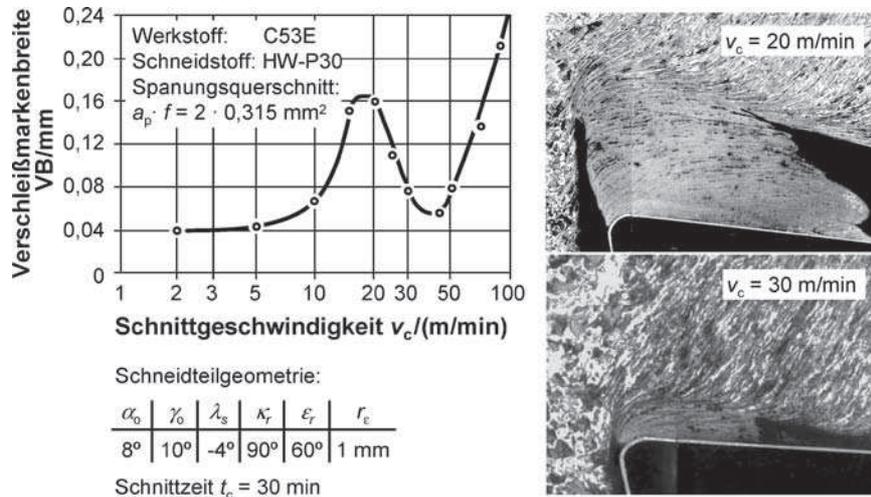


Abb. 3.38 Freiflächenverschleiß und Aufbauschneidenbildung

In Abb. 3.38 ist eine Verschleiß-Schnittgeschwindigkeitsfunktion (VB- v_c -Kurve) dargestellt. Danach steigt der Freiflächenverschleiß mit der Schnittgeschwindigkeit nicht kontinuierlich an, sondern weist mindestens zwei ausgeprägte Extremwerte auf [Opit64]. Der Verschleiß erreicht zunächst ein Maximum bei der Schnittgeschwindigkeit, bei der die Aufbauschneiden ihre größten Abmessungen aufweisen. Ein Verschleißminimum tritt bei der Schnittgeschwindigkeit auf, bei der keine Aufbauschneide mehr entsteht.

Der nach Überschreiten des Maximums trotz höherer Schnittgeschwindigkeit geringer werdende Freiflächenverschleiß ist darauf zurückzuführen, dass infolge von Rekristallisations- bzw. Umkristallisationsvorgängen die Verfestigung der Aufbauschneide abgebaut wird. Sie wird instabil und wandert nicht mehr teilweise zwischen Schnittfläche und Freifläche, sondern insgesamt über die Spanfläche ab.

Die Lage der Maxima und Minima der VB- v_c -Kurve ist temperaturabhängig. Sie wird durch jegliche Maßnahmen zur Erhöhung der Schnitttemperatur (z. B. höheren Vorschub, kleineren Spanwinkel, höhere Werkstofffestigkeit) zu niedrigeren Schnittgeschwindigkeiten verschoben. Maßnahmen zur Herabsetzung der Schnitttemperatur (z. B. Kühlung) verschieben die Extremwerte demgemäß zu höheren Schnittgeschwindigkeiten [Opit69, Peke74].

3.7.2.3 Mechanische und thermische Überbeanspruchung

Beschädigungen der Schneidkante, wie Ausbrüche, Querrisse, Kammrisse oder plastische Verformungen, treten bei mechanischer oder thermischer Überbeanspruchung auf.

Ausbrüche

Große Schnittkräfte führen leicht zu Schneidkanten- oder Eckenausbrüchen, wenn die Keil- oder Eckenwinkel des Werkzeugs zu klein sind oder ein zu spröder Schneidstoff benutzt wird. Bei derartigen Ausbrüchen ist der Verlauf der Bruchfläche durch die Schnittkrafttrichtung bestimmt [Köni75]. Auch Schnittunterbrechungen können Ausbrüche hervorrufen, vor allem bei der Bearbeitung zäher Werkstoffe, deren Späne kleben.

Kleine Ausbrüche treten auf, wenn die Werkstücke harte, nichtmetallische Einschlüsse enthalten, die bei der Desoxidation des Stahls entstehen [Opit64a, Opit66, Opit62]. Gegen diese Art örtlicher Überbeanspruchung sind die Sinteroxide und die verschleißfesteren Hartmetallsorten empfindlich, insbesondere bei Fertigungsverfahren mit relativ kleinen Spanungsquerschnitten (z. B. Reiben oder Schaben).

Ausgeprägte Schneidstoffausbrüche an Haupt- und/oder Nebenschneide können auch durch auf der Schneidkante aufschlagende Späne oder beim Drehen von Wellenabsätzen durch das Einklemmen des Spanes zwischen Schneidplatte und Werkstück verursacht werden. Die Schneidkantenausbrüche können dabei sowohl auf der Plattenober- als auch an der Plattenunterseite auftreten.

Querrisse

Bei unterbrochenem Schnitt (z. B. Fräsen) unterliegt der Schneidstoff einer starken mechanischen Wechselbeanspruchung. Diese dynamische Druckschwellbelastung kann zum Dauerbruch führen. Kurzzeitig aufeinander folgende Schnittkraftwechsel führen vor allem beim Fräsen mit Hartmetall-Werkzeugen zu so genannten Querrissen, Abb. 3.39.

Die schnell wechselnde Beanspruchung bei Lamellenspanbildung kann beim Überschreiten einer kritischen Lastspielzahl ebenfalls zur Bildung von Querrissen führen [Domk74, Beck69], z. B. bei der Zerspanung von Titanwerkstoffen.

Kammerisse

Kammerisse sind Beschädigungen der Schneide infolge thermischer Wechselbeanspruchungen, s. Abb. 3.39. Derartige Beanspruchungen entstehen hauptsächlich beim Arbeiten im unterbrochenen Schnitt.

Während des Werkzeugeingriffs heizt sich die Schneide schnell auf hohe Temperaturen auf. Nach dem Austritt aus dem Werkstück kühlt sie ab. Die Differenz zwischen höchster und niedrigster Temperatur ist u. a. vom Werkstoff, den Schnittbedingungen und dem Verhältnis der im Werkstoff und in der Luft zurückgelegten Wege abhängig. Der Einsatz von Kühlschmierstoffen ist bei unterbrochenen Schnitten im Hinblick auf die Größe der Temperaturdifferenz von besonderer Bedeutung, weil sie eine sehr viel größere Abschreckwirkung besitzen als Luft. Die Kühlung begünstigt bei Hartmetallen und keramischen Schneidstoffen die

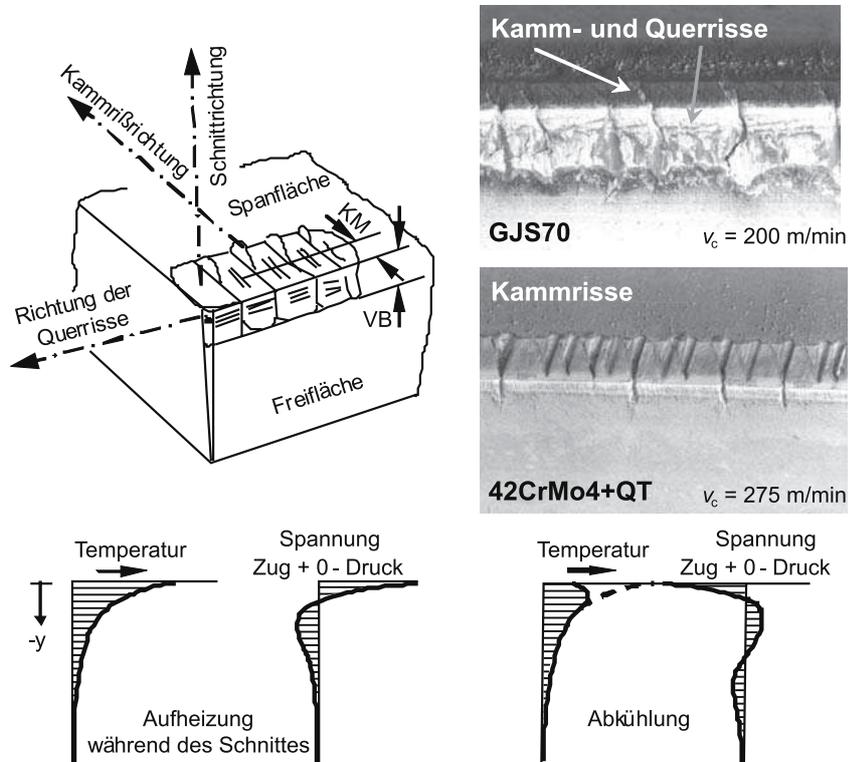


Abb. 3.39 Kamm- und Querrissbildung beim Fräsen, nach Vieregge [Vier59]

Kammrissbildung. Der Verlauf der Kammrisse deckt sich mit dem Verlauf der Isothermen des Temperaturfeldes im Schneidteil.

Die beim Fräsen oder auch beim kurzzyklischen Drehen im Schneidteil auftretenden Kammrisse sind in der Regel Temperaturwechsellrisse. Sie sind zu unterscheiden von den Thermoschockrisse, wie sie beim Drehen oder Fräsen unter Einsatz von Kühlschmierstoff entstehen können. Thermoschockrisse bilden sich durch eine einmalige schroffe Temperaturveränderung, Temperaturwechsellrisse dagegen erst allmählich im Laufe des Schneideneinsatzes im Schneidteil aus. Während beim Thermoschock die in der Kontaktzone auftretenden thermisch bedingten Zugspannungen die Festigkeit des Schneidstoffes übersteigen und unmittelbar zur Rissbildung führen, liegen die zur Ausbildung der Temperaturwechsellrisse führenden Spannungen unterhalb der Schneidstofffestigkeit. Die Entstehung von Temperaturwechsellrisen erfordert daher in der Regel mehrere periodische Temperaturwechsel.

Aufgrund des hohen Energieniveaus breiten sich Thermoschockrisse mit großer Geschwindigkeit aus. Die Rissausbreitung erfolgt weitgehend transkristallin. In Abhängigkeit vom Spannungsniveau können sie im Schneidstoff sehr große

Tiefen erreichen (> 1 mm) und damit eine erhebliche Schwächung der Schneide bewirken [Gers98].

Das Auftreten von Temperaturwechsellrissen kann sowohl im Nass- wie auch im Trockenschnitt beobachtet werden. Für ihre Ausbildung spielen – neben der Höhe der thermischen Belastung – der Schnittzyklus und die Anzahl der Schnittzyklen eine entscheidende Rolle. Der Einsatz von Kühlschmierstoff führt zu einer starken Reduzierung der zur Rissbildung erforderlichen Schnittzyklen [Gers98].

Bedingt durch die Biegebeanspruchung, der die Schneide während des Schnittvorganges unterliegt und die den thermisch induzierten Spannungen überlagert wird, vergrößern sich die Risse mit zunehmender Anzahl an Schnittzyklen und können bei entsprechender Ausgangslänge relativ schnell eine kritische, zum Bruch führende Größe erreichen. Infolge der von dem Riss ausgehenden Kerbwirkung können sie auch selbst zum Ausgangspunkt weiterer Risse werden [Gers98].

Plastische Verformung

Plastische Verformung der Schneidkante tritt auf, wenn die auf die Werkzeugschneide einwirkende thermisch-mechanische Belastung den Verformungswiderstand des Schneidstoffes übersteigt. Einflussgrößen sind die Festigkeit des zu zerspanenden Werkstoffes, die Schnittbedingungen, die Plattengeometrie sowie von Seiten des Schneidstoffes dessen Hochtemperatureigenschaften wie Härte, Druckfestigkeit und Kriechverhalten.

Schneiden aus Werkzeugstahl oder aus Schnellarbeitsstahl verformen sich umso stärker, je geringer die Differenz zwischen der Temperatur an der Schneide und der Anlasstemperatur des Schneidstoffes ist. Auch bei Hartmetallen und Cermets treten plastische Verformungen auf, allerdings erst bei höheren Temperaturen (Schnittgeschwindigkeiten) und bei höheren Kräften als bei Werkzeug- und Schnellarbeitsstählen. Hartmetalle verformen sich umso stärker, je höher der Anteil der Bindephase, meist Kobalt, ist.

Die plastische Verformung der Schneide hat eine starke Zunahme des Verschleißes zur Folge und kann zum plötzlichen Erliegen des Werkzeuges durch Rissbildung und Abscheren der Schneidkante führen. Sie begrenzt damit vor allem die beim Schruppdrehen anwendbaren Spannungsquerschnitte und Schnittgeschwindigkeiten.

3.7.2.4 Diffusion

Bei den warmverschleißfesten Hartmetall-Werkzeugen muss bei hohen Schnittgeschwindigkeiten und gegenseitiger Löslichkeit der Partner mit Diffusionsverschleiß gerechnet werden. Werkzeugstahl und Schnellarbeitsstahl erweichen schon bei Temperaturen, bei denen Diffusion kaum in Erscheinung treten kann (z. B. etwa 600°C für Schnellarbeitsstahl).

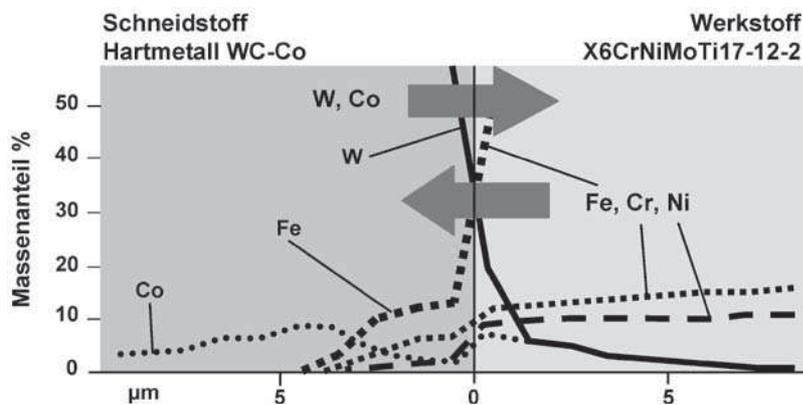
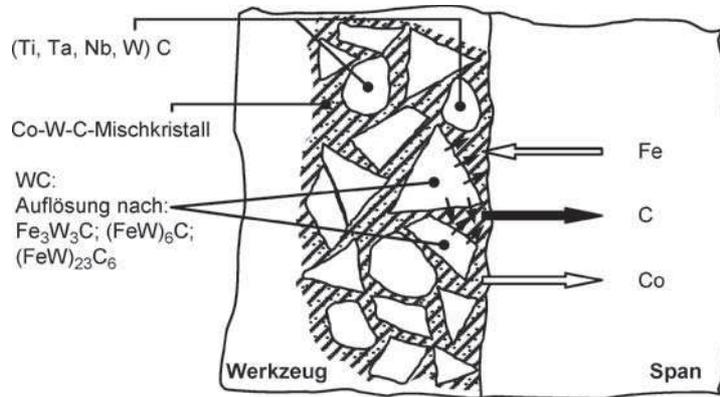


Abb. 3.40 Darstellung der Diffusionsvorgänge im Hartmetall-Werkzeug

Beim Zerspannen mit unbeschichteten Hartmetallsubstraten können folgende Reaktionen ablaufen, Abb. 3.40:

- Diffusion von Fe in die Bindephase Co,
- Diffusion von Co in den Stahl, wobei Fe und Co eine lückenlose Mischkristallreihe bilden,
- Auflösung von Wolframkarbid unter Bildung von Misch- und Doppelkarbiden in Form $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$, $(\text{FeW})_6\text{C}$ und $(\text{FeW})_{23}\text{C}_6$.

Der bei der Auflösung des Wolframkarbids freiwerdende Kohlenstoff wandert in Richtung geringerer Konzentration, d. h. in den Stahl. Die Kohlenstoffdiffusion läuft über die Kobaltphase ab. Die maximale Löslichkeit von Kohlenstoff in Kobalt liegt bei Temperaturen von 1200°C in der Größenordnung von 0,7%. Bei Anwesenheit von Fe erhöht sich die Löslichkeit auf 1,5–2%. Das eindiffundierende Eisen leitet also zwei, die Auflösung beschleunigende, Reaktionen ein. Es bietet sich zur Bildung der Eisen-Mischkarbide an und erhöht die Aufnahme von

Kohlenstoff in Kobalt, was wiederum die Voraussetzung zur Auflösung des Wolfram-Monokarbid ist.

Die zwischen Hartmetall und Stahlwerkstoffen möglichen Diffusionsvorgänge lassen sich sehr anschaulich mit Hilfe von Glühproben aufzeigen. Zu diesem Zweck wurden Hartmetall-Werkstoff-Paarungen bei einer Temperatur von 1100°C, einem Druck von 12,6 MPa und einer Haltezeit von 2 Stunden in einer Schutzgasatmosphäre aus Argon geglüht. Im Anschluss hieran wurden die an der Kontaktfläche miteinander verschweißten Proben auf einer Trennschleifmaschine senkrecht zur Kontaktebene getrennt, die entstandenen Probenhälften geschliffen, poliert und mit einer Mikrosonde die Elementerverteilung senkrecht zur Grenzfläche Schneidstoff/Werkstoff analysiert.

Wie die quantitativen Linescans in Abb. 3.40 zeigen, finden unter den gewählten Glühbedingungen zwischen dem unbeschichteten Hartmetall und dem hier gewählten austenitischen Stahlwerkstoff Diffusionsvorgänge statt. Von Seiten des Stahlwerkstoffes erfolgt eine Diffusion von Eisen, Chrom und Nickel in den Schneidstoff. In umgekehrter Richtung, d. h. vom Schneidstoff in den Werkstoff, diffundieren Wolfram und Cobalt.

Die durch die Diffusion von Eisen in das Hartmetall bedingte Auflösung des Wolframkarbides, dem Träger von Härte und Verschleißfestigkeit, führt zu einer Schwächung des Gefügeverbandes und verringert den Widerstand des Hartmetallsubstrates gegen Abrasion. Die Folge hiervon ist die Ausbildung eines ausgeprägten Kolkverschleißes, Abb. 3.41. Da Diffusionsvorgänge temperaturabhängig sind, beeinflusst die Schnittgeschwindigkeit ganz elementar die Geschwindigkeit, mit der sich der Kolkverschleiß ausbildet. Unbeschichtete Hartmetalle können daher bei der Stahlbearbeitung nur bei vergleichsweise niedrigen Schnittgeschwindigkeiten ($v_c < 100$ m/min) eingesetzt werden. Einen außerordentlich gravierenden Einfluss auf die Kolkentwicklung hat hierbei auch das Hartmetallsubstrat. Mischkarbide auf der Basis von Titan und Tantal/Niob besitzen im Vergleich zu WC eine wesentlich höhere chemische Stabilität gegenüber Eisen. Die Mischkarbide reduzieren das Eindiffundieren von Eisen in die Cobalt-Bindephase, erhöhen so

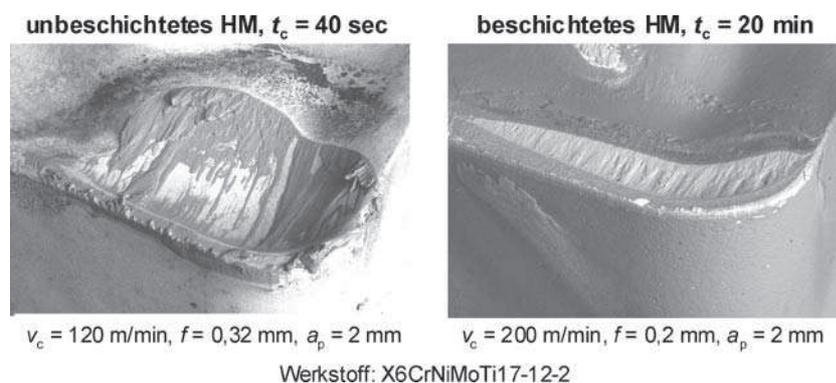


Abb. 3.41 Ausbildung des Kolkverschleißes bei einem unbeschichteten und einem beschichteten Hartmetall, nach Gerschwiler [Gers04]

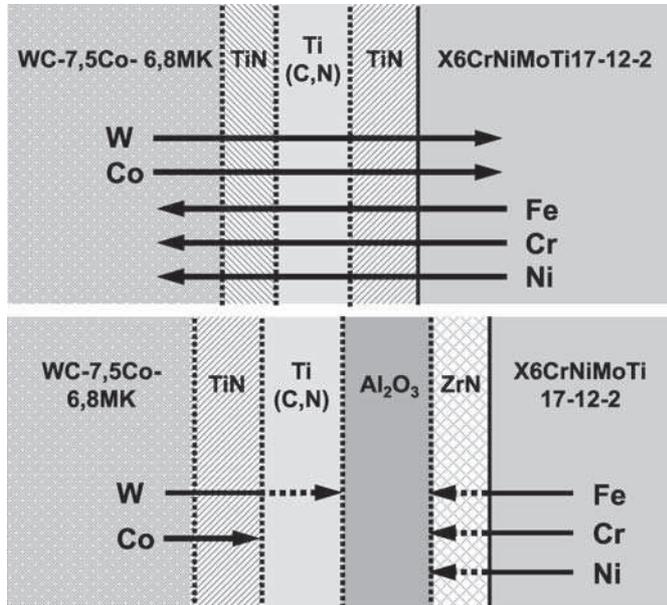


Abb. 3.42 Nachweis von Diffusionsvorgängen zwischen beschichteten Hartmetallen und Stahl in Abhängigkeit vom Schichtsystem anhand von Glühproben

den Widerstand des Schneidstoffes gegen Kolkverschleiß und verbessern damit ganz wesentlich dessen Warmverschleißfestigkeit.

Die wirkungsvollste Maßnahme zur Reduzierung des Kolkverschleißes stellt die Beschichtung des Hartmetallsubstrates dar. Hartstoffschichten versiegeln die Substratoberfläche, verhindern so den direkten Kontakt zwischen Substrat und Werkstoff und reduzieren bzw. unterdrücken damit auch Diffusionsvorgänge. Wie die Linescans von Glühproben in Abb. 3.42 zeigen, können bei TiN- bzw. TiCN-Schichten durchaus noch Diffusionsvorgänge zwischen dem Hartmetallsubstrat und dem Werkstoff erfolgen. Im Gegensatz hierzu erfolgen bei dem beschichteten Hartmetall mit Al_2O_3 als Zwischenschicht keine Diffusionsvorgänge mehr. Die Schicht aus Aluminiumoxid wirkt damit als Diffusionsbarriere. In der ZrN-Deckschicht finden sich die Elemente Eisen, Nickel sowie Chrom, in der TiN-Grenzschicht die von Wolfram und Kobalt, Abb. 3.42. Im Bereich der Aluminiumoxidzwischenlage geht der nachweisbare Gehalt dieser Elemente auf 0 Massen-% zurück. Vor allem finden sich auf der jeweils gegenüberliegenden Seite der Al_2O_3 -Zwischenschicht keine Hinweise darauf, dass Eisen, Chrom, Wolfram oder Kobalt durch die Al_2O_3 -Zwischenschicht hindurch diffundiert sind.

Die Beobachtung, wonach elektrisch isolierende Oxidschichten auf Hartmetallen im Gegensatz zu halbleitenden Nitrid- oder Karbonitridschichten als Diffusionsbarriere bei Luft- oder Wasserausschluss wirken, lässt sich wie folgt erklären. In elektrisch isolierenden Oxiden wie Al_2O_3 oder HfO_2 ist nur Ionendiffusion möglich, aber keine Wanderung von Elektronen oder Löchern. Dies hat zur Folge,

dass „Komponentendiffusion“ nicht möglich ist. „Komponente“ ist ein Eisenatom, welches gedanklich in ein Ion und ein Elektron zerlegt werden kann. Aus Gründen der Elektroneutralität kann das Eisenatom seine Elektronen nicht außerhalb der Schicht „abgeben“ und dann als Ion durch die Schicht wandern. Die Folge ist, dass diese Oxidschichten als Sperre wirken, solange es für die Elektronen keinen Weg „außen herum“ gibt und auch der Transport von Sauerstoffionen langsam genug ist (dieser ist erfahrungsgemäß in Oxiden um Größenordnungen langsamer als der Kationentransport). In halbleitenden oder leitenden Schichten kann das Elektron jedoch mit dem Ion zusammen durch die Schicht wandern, so dass im Endeffekt die Komponente Eisen durch die Schicht wandert und sich mit dem Substrat legiert. Umgekehrt ist dann auch Transport von Co oder W in den Span möglich. Bei den bei der Zerspanung am Werkzeug vorherrschenden Temperaturen von $>800^{\circ}\text{C}$ ist bereits diffusiver Transport möglich. Die Diffusionskoeffizienten sind zwar noch klein, aber die notwendigen Diffusionswege sehr kurz.

Der bei TiN- und TiCN-beschichteten Hartmetallen durch die Hartstoffschicht möglichen Diffusion von Eisen in das Hartmetallsubstrat kommt jedoch nicht die gleiche Bedeutung zu, wie dies bei unbeschichteten Substraten der Fall ist. Im Gegensatz zu einem unbeschichteten Hartmetall schützt die Schicht das Substrat zusätzlich vor dem abrasiven Angriff des ablaufenden Spanes. Vor allem durch ihre gegenüber dem Substrat wesentlich höhere Härte tragen Hartstoffschichten zu einer signifikanten Reduzierung des Abrasionsverschleißes bei. Auf diese Weise begründen Hartstoffschichten das hohe Leistungsvermögen der beschichteten Werkzeuge und ermöglichen bei der Zerspanung von Stahlwerkstoffe im Vergleich zu unbeschichteten Hartmetallen deren Einsatz bei vielfach höheren Schnittgeschwindigkeiten, Abb. 3.41. Sobald jedoch die Hartstoffschicht in der Kontaktzone auf der Spanfläche durchgerieben und das Substrat frei gelegt ist, tragen die nun wieder zwischen Substrat und ablaufendem Span erfolgenden Diffusionsvorgänge in Verbindung mit der abrasiven Wirkung des Spanes auf das Substrat zu einer Beschleunigung des Kolkverschleißes bei.

3.7.2.5 Verzunderung

Betrachtet man ein Werkzeug nach dem Schnitt, so sind vielfach in der Nähe der Kontaktzonen Anlauffarben zu erkennen, die auf eine Verzunderung (Oxidationsvorgang) des Schneidstoffs hindeuten. Die Verzunderung ist je nach Schneidstofflegierung und Schneidentemperatur von unterschiedlicher Bedeutung, Abb. 3.43. Hartmetall beginnt bereits bei $700\text{--}800^{\circ}\text{C}$ zu verzundern, wobei Hartmetalle aus reinem Wolframkarbid und Kobalt stärker oxidieren als solche mit Zusätzen von Titankarbid oder anderen Karbiden [Kief65].

Schon unter üblichen Schnittbedingungen bildet sich am WC-haltigen Werkzeug in der Nähe der Schneidkante durch die auftretenden Schnitttemperaturen und unter Einwirkung des Luftsauerstoffs ein Oxidfilm. Dieser bedeckt dabei die Gebiete, an denen der Luftsauerstoff freien Zutritt hat, also die Enden der Kontaktzonen auf Freifläche, Nebenfriefläche und Spanfläche, Abb. 3.44.

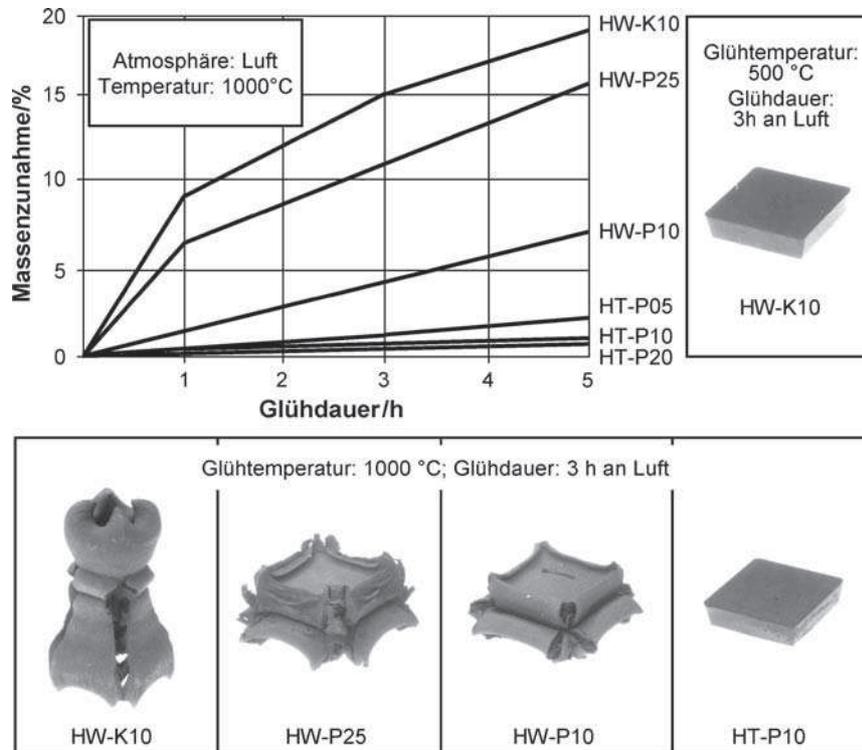


Abb. 3.43 Gewichtszunahme beim Glühen an Luft in Abhängigkeit vom Schneidstoff

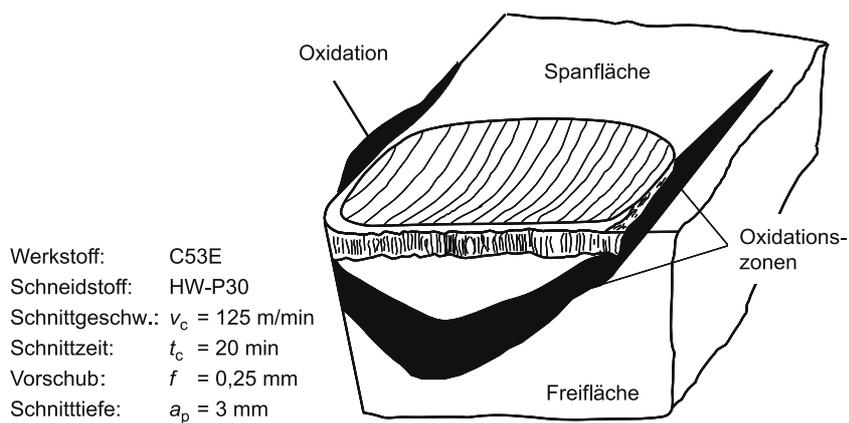


Abb. 3.44 Oxidationszonen am Hartmetall-Drehwerkzeug

Der zerstörende Einfluss der Oxidation auf das Hartmetallgefüge kann besonders deutlich an der Nebenschneide beobachtet werden. Es entsteht ein komplexes Wolfram-Kobalt-Eisen-Oxid, das sich infolge seines gegenüber dem Hartmetall größeren Molvolumens warzenartig ausbildet und zum Ausbruch der Schneidenecke führen kann [Köni75].

Für Werkzeugstähle und Schnellarbeitsstähle ist eine Verzunderung praktisch ohne Bedeutung, da ihre Warmfestigkeit überschritten wird, bevor die Oberflächen stärker oxidieren.

3.7.3 Verschleißformen und -messgrößen

Die während des Zerspanungsvorgangs am Schneidteil auftretenden Verschleißerscheinungen, bilden sich je nach Belastungsart und -dauer unterschiedlich stark aus. Abbildung 3.45 zeigt hauptsächlich am Drehwerkzeug vorkommende Verschleißformen. Der Schneidteil verschleißt auf der Spanfläche (Kolkverschleiß) sowie auf der Haupt- und Nebenfleifläche (Freiflächenverschleiß), Abb. 3.46. In Abhängigkeit von den Schnittbedingungen und der Werkstoff-Schneidstoff-Paarung kann der Freiflächenverschleiß am Rand der Kontaktzone an Haupt- und Nebenschneide des Werkzeugs ein deutliches Maximum aufweisen, welches sich spanflächenseitig fortsetzt. Dieser sog. Kerbverschleiß wird hervorgerufen durch die am Ende des Kontaktbereichs Werkzeug-Span vorherrschenden schroffen

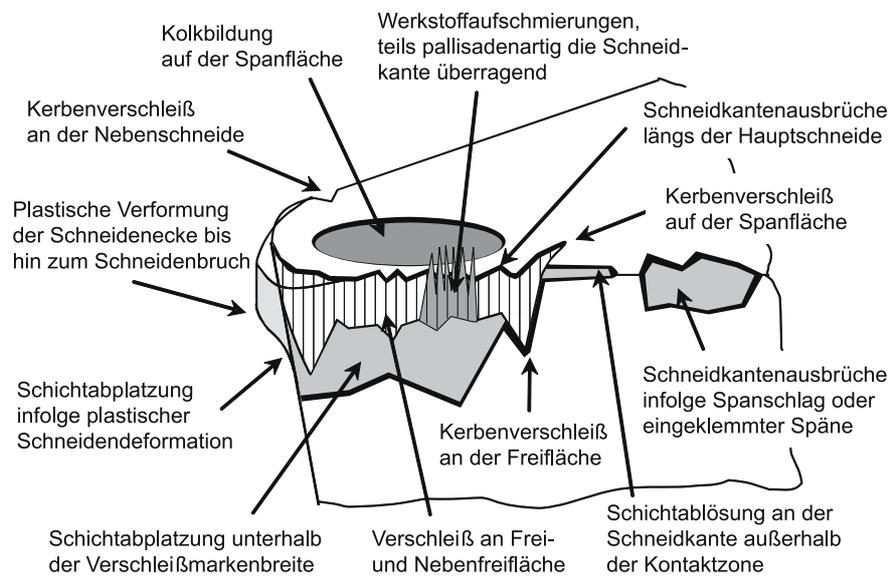


Abb. 3.45 Charakteristische Verschleißformen am Schneidteil beim Drehen

Übergänge mechanischer und thermischer Belastungen, den abrasiven Charakter des scharfkantigen Spanrandes bzw. der Vorschubkämme und der Werkstückkante sowie den direkten Kontakt mit der Atmosphäre (Abb. 3.46).

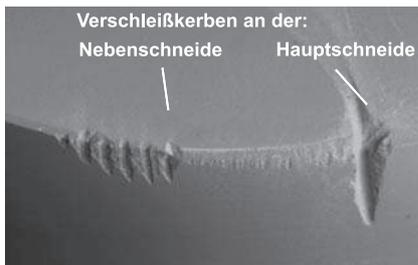
Die Verschleißmessgrößen sind schematisch in Abb. 3.47 dargestellt. Im einzelnen unterscheidet man die Verschleißmarkenbreite VB, den Schneidversatz SV_α und SV_γ in Richtung der Frei- bzw. Spanfläche gemessen, die Kolkentiefe KT und den Kolkmittenabstand KM, aus denen das Kolkverhältnis $K = KT/KM$ gebildet wird.



Schneidstoff: Cermet
Werkstoff: 42CrMo4+QT
Schnittbedingungen:
 $v_c = 400$ m/min
 $f = 0,1$ mm
 $t_c = 12$ min
 $a_p = 0,5$ mm
Plattengeometrie:
SPGN 120308



Schneidstoff: PCBN
Werkstoff: Nickelbasislegierung
Schnittbedingungen:
 $v_c = 300$ m/min
 $f = 0,16$ mm
 $t_c = 1,6$ min
 $a_p = 0,3$ mm
Plattengeometrie:
VBMW 160412



Schneidstoff: Schneidkeramik
Werkstoff: Nickelbasislegierung
Schnittbedingungen:
 $v_c = 220$ m/min
 $f = 0,16$ mm
 $t_c = 2,3$ min
 $a_p = 0,3$ mm
Plattengeometrie:
RCGX090700T00515

Abb. 3.46 Beispiele für die Ausbildung von Kolk-, Freiflächen- und Kerbverschleiß in Abhängigkeit von Schneidstoff und zerspantem Werkstoff

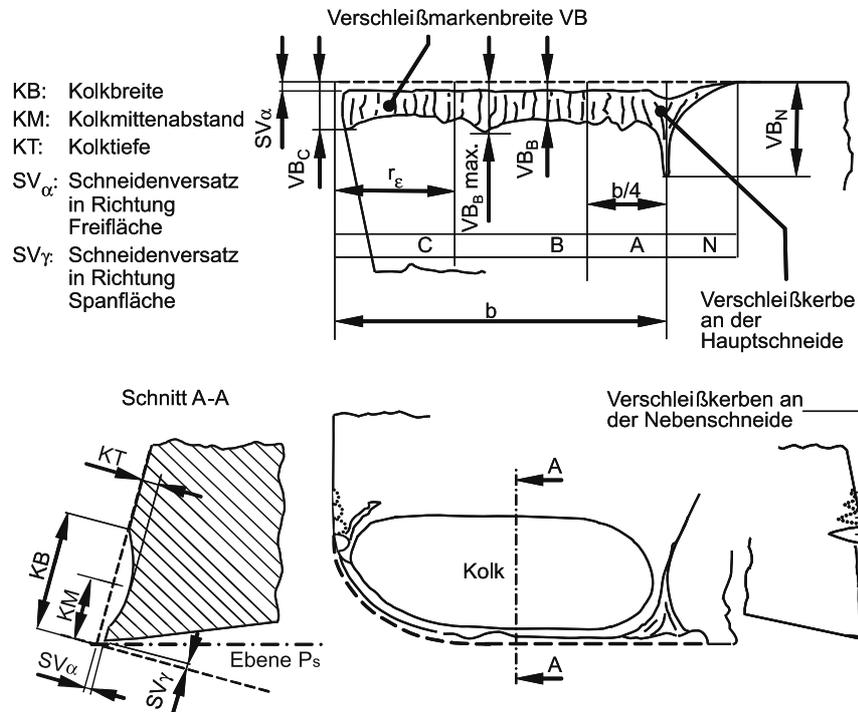


Abb. 3.47 Verschleißformen und -messgrößen am Schneidteil, nach DIN ISO 3685

3.8 Zerspanungstheorie

3.8.1 Die Theorie der Scherebene

Die Modellvorstellung der Scherebene geht von idealen Zerspanungsverhältnissen aus. Es sind gefordert:

- Ideal scharfe Schneidkeile,
- Schneidkeile, die keinem Verschleiß unterliegen,
- Darstellung mechanischer Lasten durch Ersatzkräfte und
- Ideal-plastisches Materialverhalten.

Die sich aus diesem Modell abgeleitete Spanbildungstheorie (Scherebenen-theorie) geht davon aus, dass die Verformung nur in einer Ebene, der Scherebene, erfolgt. Per Definition verläuft die Scherebene ebenso wie das Werkzeug- und Werk-Bezugssystem durch den ausgewählten Schneidpunkt (Abb. 3.48).

Im Weiteren wird die Scherebene P_Φ im Werkzeug-Bezugssystem betrachtet. Sie ist eine Ebene, die gegen die Werkzeug-Schneideebene P_s um den Scherwinkel Φ geneigt ist.

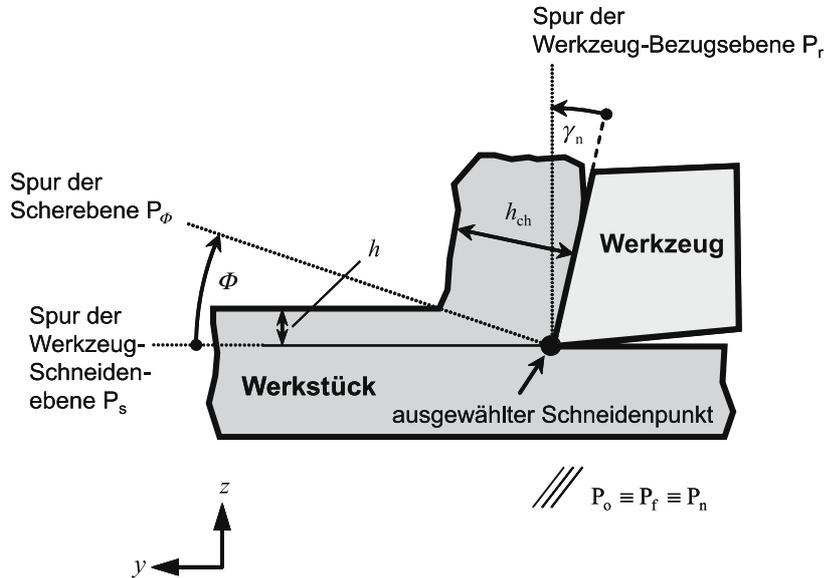


Abb. 3.48 Modellvorstellung der Scherebene

Die Forderungen an die Verfahrenskinetik sind erfüllt, wenn gilt:

- Werkzeug-Einstellwinkel $\kappa_r = 90^\circ$
- Werkzeug-Neigungswinkel $\lambda_s = 0^\circ$

Es wird also ein freier, orthogonaler Schnitt vorausgesetzt. Das Scherebenenmodell hat den Vorteil, dass es eine sehr gute Überschaubarkeit der an sich komplizierten Zerspanvorgänge ermöglicht.

Wenn die Einflüsse von Eckenradius und Nebenschneide gegenüber dem der Hauptschneide vernachlässigbar sind, kann die Theorie der Scherebene auch für den gebundenen Schnitt eingesetzt werden.

Durch den Scherwinkel können Werkstoff- und Schneidstoffeigenschaften sowie thermische Lasten und Reibungsverhältnisse, die im Kontakt von Span und Spanfläche herrschen, makroskopisch berücksichtigt werden, so dass eine Berechnung wichtiger Parameter möglich wird. Außerdem stellt der Scherwinkel den Zusammenhang zwischen Spanungsdicke h und Spandicke h_{ch} her. (Der Index ch steht für Span, engl. chip.)

$$h_{ch} = \frac{\cos(\Phi - \gamma_n)}{\sin \Phi} \cdot h \quad (3-14)$$

Durch den Scherwinkel, lässt sich nun in der Scherebene der Flächeninhalt der Scherfläche A_ϕ berechnen:

$$A_\phi = b \cdot \frac{h}{\sin \Phi} \quad (3-15)$$

Ebenso kann zur Berechnung der Spangeschwindigkeit v_{ch} die Kontinuitätsgleichung angewendet werden. Hier liegt die Vorstellung zugrunde, dass ein Massestrom durch eine Kontrollfläche, hier die Scherfläche, fließt. Unter der Voraussetzung, dass sich die Dichte des Werkstoffs durch die mechanische und thermische Belastung nicht ändert, gilt:

$$\dot{m} = \text{const.} \Rightarrow |\vec{v}_c| \cdot A = |\vec{v}_{\text{ch}}| \cdot A_{\text{ch}} \quad (3-18)$$

Es folgt:

$$|\vec{v}_{\text{ch}}| = \frac{h}{h_{\text{ch}}} \cdot |\vec{v}_c| = \frac{1}{\lambda_h} \cdot |\vec{v}_c| \quad (3-19)$$

3.8.1.2 Berechnung der Zerspankraft

Es wird angenommen, dass der Scherwinkel eine Funktion der Schubspannung in der Scherebene ist, was sich in den folgenden Schritten zeigen wird. Zunächst gilt:

$$\tau_{\Phi} = \frac{|\vec{F}_{\Phi}|}{A_{\Phi}} \quad (3-20)$$

Die Zerspankraftkomponente in der Scherebene, die Scherkraft F_{Φ} , lässt sich durch die resultierende Zerspankraft F_z darstellen. Anhand der Winkelbeziehungen im Kreis des THALES gilt nach Abb. 3.50:

$$|\vec{F}_{\Phi}| = |\vec{F}_z| \cdot \cos(\Phi + \rho - \gamma_n) \quad (3-21)$$

Der Betrag der Zerspankraft lässt sich nun aus den Gln. 3-20 und 3-21 berechnen:

$$|\vec{F}_z| = \frac{\tau_{\Phi}}{\sin \Phi \cdot \cos(\Phi + \rho - \gamma_n)} \cdot b \cdot h \quad (3-22)$$

Dem Kreis des Thales aus Abb. 3.50 können die funktionalen Zusammenhänge der Beträge der Zerspankraftkomponenten Schnittkraft und Vorschubkraft von der Zerspankraft entnommen werden.

$$|\vec{F}_c| = |\vec{F}_z| \cdot \cos(\rho - \gamma_n) \quad (3-23)$$

$$|\vec{F}_f| = |\vec{F}_z| \cdot \sin(\rho - \gamma_n) \quad (3-24)$$

Wird nun die Gl. 3-22 in die Gln. 3-23 und 3-24 eingesetzt, gilt für die Beträge der Zerspankraftkomponenten:

$$|\vec{F}_c| = \frac{\cos(\rho - \gamma_n) \cdot \tau_{\Phi}}{\sin \Phi \cdot \cos(\Phi + \rho - \gamma_n)} \cdot b \cdot h \quad (3-25)$$

$$|\vec{F}_f| = \frac{\sin(\rho - \gamma_n) \cdot \tau_{\Phi}}{\sin \Phi \cdot \cos(\Phi + \rho - \gamma_n)} \cdot b \cdot h \quad (3-26)$$

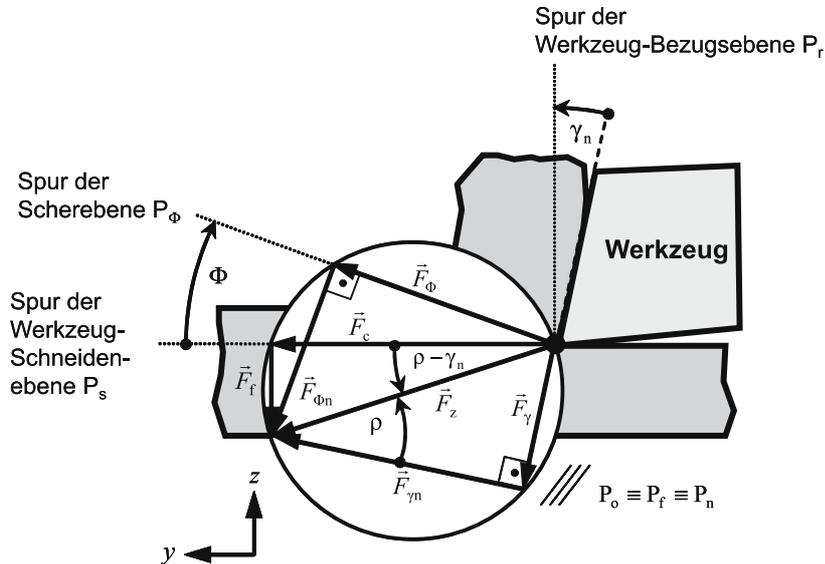


Abb. 3.50 Kreis des Thales für den Kräfteplan nach Merchant

3.8.1.3 Berechnung des Scherwinkels

Krystof entwickelte ein Modell zur einfachen Berechnung des Scherwinkels [Krys39]. Er machte folgende Annahmen:

- Die Theorie der Scherebene gilt.
- Die maximale Schubspannung führt zu Werkstoffversagen.

Im Hauptachsensystem treten die maximalen Schubspannungen unter einem Winkel von 45° auf. Für Rechnungen am Zerspanungsvorgang wird die Lage des Hauptachsensystems näherungsweise in Richtung der resultierenden Kontaktspannung angenommen (vgl. Abb. 3.51).

Es wird vereinfacht, indem die Hauptspannung nicht durch den Spannungstensor, sondern einfach durch Vektoraddition dargestellt wird. In diesem Fall gibt der Reibungswinkel näherungsweise die Orientierung des Hauptachsensystems an.

Aus der Abb. 3.51 ist der funktionale Zusammenhang zwischen dem Scherwinkel, dem Werkzeug-Orthogonalspanwinkel und dem Reibungswinkel abzuleiten. Es gilt für den Scherwinkel:

$$\Phi = \frac{\pi}{4} - (\rho - \gamma_n) \quad (3-27)$$

Merchant schlug eine Berechnungsmöglichkeit für den Scherwinkel vor, bei der folgende Voraussetzungen getroffen werden [Merc45, Merc45a]:

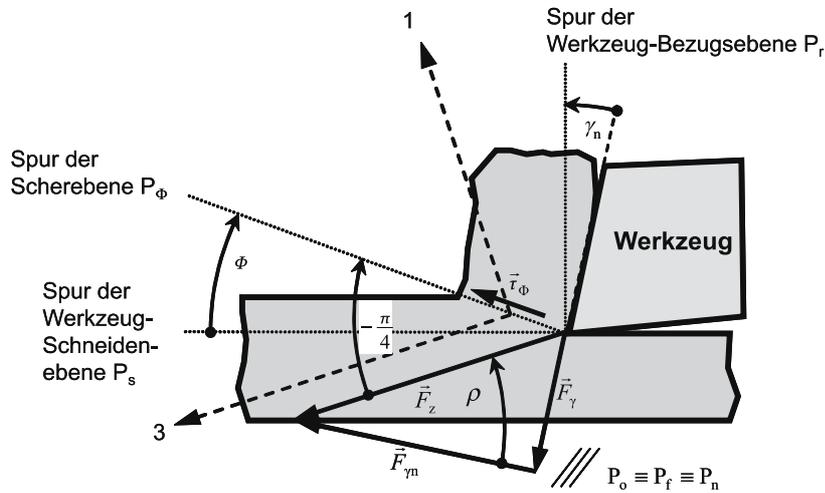


Abb. 3.51 Prinzip der maximalen Schubspannung nach KRYSSTOF [Krys39]

- Die Theorie der Scherebene gilt.
- Die Lage der Scherebene wird durch das Minimum der Schnittenergie bestimmt.

Der Betrag der Schnittkraft kann am Kreis des Thales der Abb. 3.50 abgelesen werden:

$$|\bar{F}_c| = \frac{\cos(\rho - \gamma_n)}{\cos(\Phi + \rho - \gamma_n)} \cdot \frac{b \cdot h}{\sin \Phi} \cdot \tau_\Phi \quad (3-28)$$

Die notwendige und die hinreichende Bedingung für die Berechnung der Lage des Energieminimums sind:

$$\text{notw.: } \frac{\partial E_c}{\partial \Phi} = 0 \quad \text{hinr.: } \frac{\partial^2 E_c}{\partial \Phi} \neq 0 \quad (3-29)$$

Da sich die Schnittenergie als Produkt aus Schnittkraft und Schnittweg berechnet und der Schnittweg keine Funktion des Scherwinkels ist, kann vereinfacht werden:

$$\text{notw.: } \frac{l_c \cdot \partial |\bar{F}_c|}{\partial \Phi} = 0 \quad \text{hinr.: } \frac{\partial^2 |\bar{F}_c|}{\partial \Phi} \neq 0 \quad (3-30)$$

Es folgt dann für den Scherwinkel:

$$\Phi = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} \cdot (\rho - \gamma_n) \quad (3-31)$$

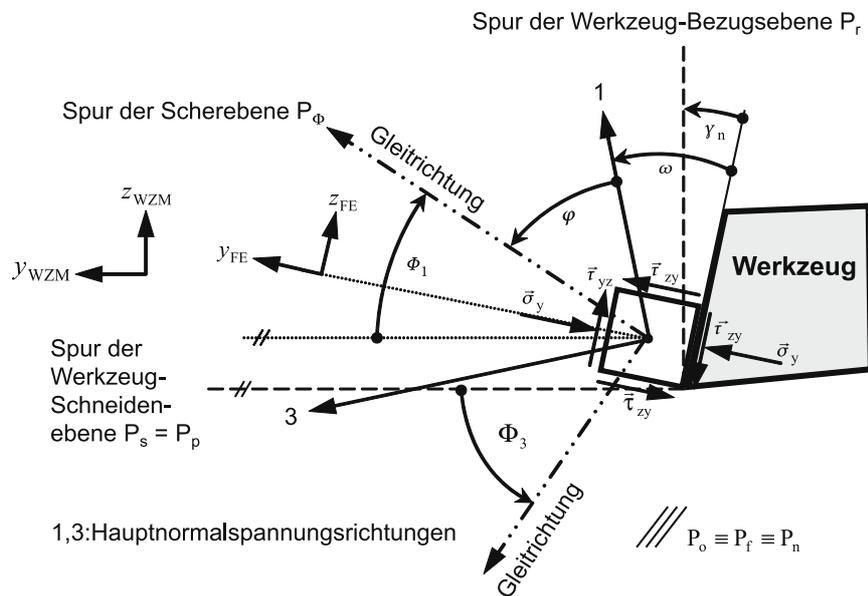


Abb. 3.52 Flächenelement am Schneidkeil, nach Hucks [Huck51]

3.8.2 Anwendung der Plastizitätslehre bei der Zerspanung

Hucks und Opitz entwickelten eine Scherwinkelgleichung, indem sie die Gleittheorie nach Mohr auf den orthogonalen Zerspanungsvorgang anwendeten [Huck51, Opitz53, Mohr06]. Durch diese Theorie wird es im Gegensatz zu den Modellen von Krystof und Merchant möglich, einen materialspezifischen Gleitwinkel anstatt der idealisierten 45° zu berücksichtigen. An dieser Stelle wird nochmals darauf hingewiesen, dass der bisher bekannte Scherwinkel nicht zwingend gleich dem Winkel sein muss, der die tatsächliche Lage der Gleitfläche angibt, da die Richtung der Scherebene bisher nur rein geometrisch anhand idealer Betrachtungen bestimmt wurde. Hier wird nun der Richtungswinkel der Gleitfläche gegenüber der Werkzeug-Schneidebene als Scherwinkel Φ bezeichnet. Es wird zunächst ein quadratisches Flächenelement (FE) auf der Spanfläche betrachtet, das durch das Werkzeug sowohl Schub- als auch Druckbelastungen erfährt (Abb. 3.52).

Die Schubspannungen treten auf Grund des Satzes der Gleichheit der Schubspannung auch an allen übrigen Seitenflächen des quadratischen Elementes auf. Auf Grund des unbehinderten Abgleitens des Spans über die Spanfläche liegt in dieser Richtung eine sehr geringe Druckspannung vor, die im Folgenden vernachlässigt wird. Es existieren also zwei Druckspannungen und vier Schubspannungen an dem betrachteten Flächenelement.

Ermittelt man nun die Hauptnormalspannungen mit Hilfe des Mohr'schen Spannungskreis, lässt sich feststellen, dass folgende Gleichung gilt:

$$\omega = \frac{1}{2} \arctan(2 \cdot \mu) \quad (3-32)$$

Der Winkel zwischen Spanfläche und Hauptspannungsrichtung ist also allein durch den Reibwert zwischen Spanfläche und Span bestimmt. Über diesen Zusammenhang wird beispielsweise deutlich, wieso sich bei verschiedenen Schnittgeschwindigkeiten verschiedene Scherwinkel ergeben. Der Reibwert ist abhängig von der Schnittgeschwindigkeit und verändert somit die Hauptspannungsrichtung. Die Gleitrichtung wiederum ist um einen stoffabhängigen Winkel φ gegenüber den Hauptspannungsrichtungen geneigt. Dieser Winkel kann mit Hilfe von Fließversuchen und des Mohr'schen Spannungskreis aus der Druckfließspannung σ_D und der Schubfließspannung τ_F errechnet werden:

$$\varphi = 45 - \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{\sigma_D - 2\tau_F}{\sigma_D}\right) \quad (3-33)$$

Für den idealplastischen Körper, der näherungsweise durch Stahl an der Fließgrenze verwirklicht wird, bildet sich die Gleitebene unter 45° zu der Hauptspannungsrichtung aus, da dort die maximale Schubspannung auftritt [Huck51].

Hiermit ergeben sich relativ zur Spanfläche die in Abb. 3.52 dargestellten Hauptspannungs- und Gleitrichtungen. Mit Hilfe der Winkel γ , φ , und ω lässt sich nun der Gleitwinkel Φ_1 berechnen:

$$\Phi_1 = \varphi - \frac{1}{2} \arctan(2\mu) + \gamma_n \quad (3-34)$$

Der Gleitwinkel Φ_3 liegt im noch unverformten Bereich, weshalb nur der Gleitwinkel Φ_1 , welcher identisch mit dem Scherwinkel ist, von Bedeutung ist. Der hier berechnete Scherwinkel setzt eine Extrapolation des Spannungszustands über die Scherebene und die Verschleißmarkenbreite voraus, ebenso wie die Ausbildung eines Fließspans. Diese Näherung erwies sich als richtig in Übereinstimmung mit den Versuchen, die an Stoffen mit geneigten und zur σ -Achse parallel verlaufenden Hüllgeraden vorgenommen worden sind. Versuche mit Materialien mit gekrümmter Hüllkurve wurden von Hucks nicht vorgenommen [Huck51].

Mit Hilfe des Scherwinkels lassen sich nun auch die Zerspankräfte berechnen. Dazu werden die Spannungen, die in der Scherebene wirken, mit der Scherebenenfläche multipliziert, woraus sich eine Normal- und Tangentialkraft in der Scherebene ergibt. Aus diesen Kräften lassen sich nun die Schnitt- und Vorschubkraft berechnen. Auf die Herleitung der von Hucks ermittelten Formeln soll an dieser Stelle verzichtet werden. Für Stahl, welcher eine zur σ -Achse parallele Hüllgerade

hat, ergeben sich nach Hucks mit der Spannungsbreite b und Spannungsdicke h folgende Formeln für die Schnitt- und Vorschubkraft:

$$F_c = \tau_0 \cdot b \cdot h \cdot \left[\frac{1}{2\sqrt{\mu^2 + \frac{1}{4}}} + \cot g(\phi) \right] \quad (3-35)$$

$$F_f = \tau_0 \cdot b \cdot h \cdot \left[\frac{\cot g(\phi) - 1}{2\sqrt{\mu^2 + \frac{1}{4}}} \right] \quad (3-36)$$

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die sehr zahlreichen experimentellen Zusammenhänge bei der Spannbildung nur von einigen wenigen Stoffzahlen und dem Reibwert abhängen. In der Arbeit von Hucks war die Erkenntnis grundsätzlich neu, dass das Spannungsfeld im Span an der Schneidkante bis auf seine Intensität nur vom Reibwert und der Normalenrichtung der Hüllgeraden abhängt [Huck51].